

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Stručni studij

**NEKONVENCIONALNI VISOKONAPONSKI MJERNI
TRANSFORMATORI**

Završni rad

Tomislav Kovačević

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Konvencionalni mjerni transformatori u industriji, elektroenergetskom sustavu.....	2
2.1. Mjerni transformatori.....	3
2.2. Tehnički zahtjevi za mjerne transformatore.....	5
2.2.1. Električni zahtjevi.....	5
2.2.2. Drugi zahtjevi.....	11
2.3. Visokonaponski mjerni transformatori.....	14
3. Nekonvencionalni mjerni transformatori.....	18
3.1. Optički kabel.....	19
3.2. Optički senzori.....	23
3.2.1. Faradajev efekt.....	25
3.2.2. Pockelsov efekt.....	26
3.3. Rogowski svitak.....	27
3.4. Pametne legure.....	30
3.5. Strujni mjerni transformator na bazi optičkih vlakana.....	32
4. Digitalni standard IEC 61850.....	35
5. Zaključak.....	37
6. Literatura.....	38
7. Sažetak.....	40
8. Životopis.....	41
9. Prilozi.....	42

1. Uvod

Kako iz dana u dan elektroenergetski sustav postaje sve veći i kompleksniji tako raste i potreba za što preciznijim mjerenjima. Ti razlozi su tehnički gdje je najvažnija stabilnost i sigurnost cijele mreže i ekonomski razlozi kako bi se mogla pratiti proizvodnja i potrošnja električne energije te naplatiti potrošačima njihova potrošnja.

Dalje, sve većim trendovima, zahtjevima u elektroenergetskim sustavima prema obnovljivoj energiji u Europi dovelo je do više izvora, distributera električne energije kao što su vjetroelektrane, solarne elektrane koji su spojeni na elektroenergetski sustav.

Trenutačni elektroenergetski sustav se još uvelike oslanja na konvencionalne mjerne transformatore koji su dosegli svoj optimum i nisu se mijenjali u posljednjih nekoliko desetljeća.

Uređaji za mjerenje električne snage prošli su značajna poboljšanja od uvođenja tako npr. pametni uređaji za energetska mjerenja, analizatori snage i kvalitete, uređaji za mjerenje tokova snaga otvorili su nove mogućnosti za prikupljanje informacija o stanju elektroenergetskog sustava. Ovi moderni instrumenti i zaštitni uređaji su spojeni na nisko naponsku stranu instaliranih strujnih i naponskih transformatora sa limitiranim propustom kako bi prikupili podatke o stanju mreže, zaštitili je, dopustili mjerenja i naplatu. Trenutačno performanse ovih uređaja su limitirane karakteristikama konvencionalnih mjernih transformatora koji se koriste u mrežama.

Nove nekonvencionalne tehnologije dolaze sve više u upotrebu. Tako npr. senzori na bazi optičkog Faraday-evog efekta, hibridni električno/optički senzori i Rogowski svitak su svi predloženi za zamjenu klasičnih strujnih mjernih transformatora, a djelitelji napona i optički Pockels-ov efekt za zamjenu naponskih mjernih transformatora [1].

Mnogi od ovih novih uređaja imaju mogućnost digitalne komunikacije čime se osim mjerenja dobivaju i velike količine podataka koje se mogu obraditi, iskoristiti i sačuvati.

Tema nekonvencionalnih mjernih transformatora obrađena je kroz pregled konvencionalnih mjernih transformatora i zahtjeve kojima isti podlažu. Nakon čega je obrađeno po čemu se nekonvencionalni transformatori razlikuju od konvencionalnih, njihove prednosti, nedostatke i načine pomoću kojih vrše mjerenja zbog kojih i nose sam naziv nekonvencionalni, te je obrađen i konkretan primjer jednog nekonvencionalnog mjernog transformatora.

2. Konvencionalni mjerni transformatori u elektroenergetskom sustavu

Električna energija korištena u kućanstvima, industriji, rasvjeti i ostalim primjenama proizvodi se u elektranama koje su u velikom broju slučajeva nalaze daleko od mjesta potrošnje. Ova postrojenja su sa potrošačima povezana pomoću distribucijske mreže koja je jako velika i razgranata te povezana sa više različitih proizvođača, potrošača, zemalja unutar Europe. Tako u nekom datom trenutku potrošači iz Hrvatske mogu trošiti električnu energiju proizvedenu u Danskoj.

Kako bi se kontrolirala razmjena električne energije moramo provoditi mjerenja na različitim točkama kako bi znali status cjelokupne električne mreže. To se u praksi izvodi realnim, trenutnim mjerenjem struje i napona dobivajući vrijednosti za različite točke u mreži. Mjerenja se uzimaju kod elektrana, potrošača ali i kod svakog spoja prijenosnih vodova, transformatorskih i razvodnih postrojenja.

Više je razloga za provoditi takva mjerenja od kojih su najvažniji tehnički i ekonomski razlozi kako bi se mogla pratiti proizvodnja i potrošnja električne energije i naplatiti potrošačima njihova potrošnja. Mjerenja se moraju izvoditi kako bi se mogla provoditi kontrola i upravljanje mrežom izbjegavajući pritom preopterećenja, detektirajući kvarove, optimizirati proizvodnju i distribuciju, čineći cjelokupan sustav maksimalno ekonomičnim i sigurnim.

U ranim danima razvoja električne mreže cjelokupan sustav je bio mali i nije bilo puno proizvođača i potrošača tako da nije ni bilo velikih zahtjeva za mjerenjima zbog čega su uređaji za mjerenje bili izgrađivani za pojedinačne primjene. Razvojem mreža, znatno se povećavaju veličine i kompleksnost, težina mjerenja gdje su zahtjevi bili 100 A za ampermetre i 10 000 V za voltmetre, a danas se te vrijednosti kreću i do 5000 A za struju te 800 kV za napon.

Sve većom kompleksnošću električnog sustava zahtjevi za mjerenjima u istoj rasti kao i broj mjerenih točaka koja se sve više danas objedinjuju na centraliziranim kontrolnim pločama kako bi se što lakše mogao kontrolirati cijeli sustav. Ovakav način zahtjeva ugradnju mnogobrojnih sličnih uređaja za mjerenje u manji prostor gdje postaje očito kako upotreba manjih, standardiziranih uređaja će biti ekonomski isplativija, lakša za ugradnju i kontrolu.

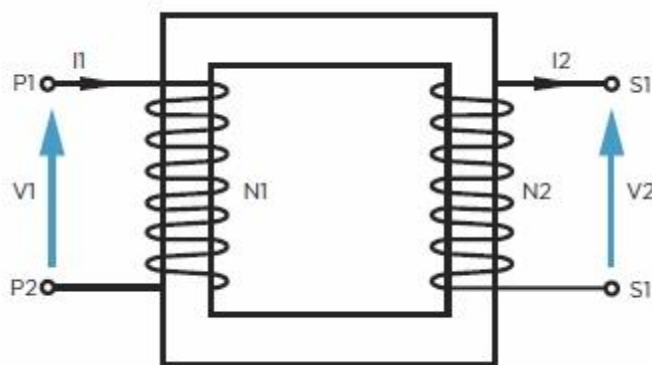
Tu koristimo mjerne transformatore koji smanjuju iznose struje i napona na niže ali proporcionalne vrijednosti. Te vrijednosti su dovoljno niske kako bi dopustile svim mjernim uređajima da budu izrađeni od ekonomski i tehnološki prihvatljivih materijala i veličina.

Uglavnom po dogovoru svi današnji mjerni transformatori smanjuju vrijednosti napona na 100V i vrijednost struje na 1 – 5 A [2].

2.1. Mjerni transformatori

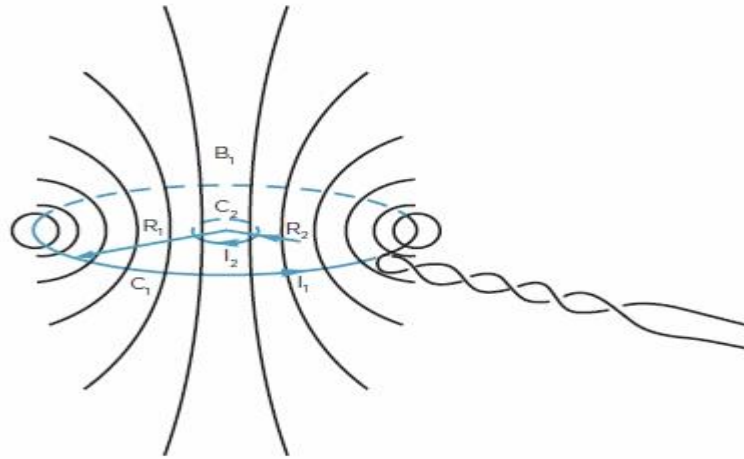
Mjernim transformatorima primarna primjena je kod mjerenja. Oni su električni uređaji koji koriste elektromagnetska svojstva izmjenične struje i feromagnetskih materijala kako bi promijenili napon i struju na drukčiju razinu koju su primili na ulazu slika 2.1.1

Promjenjive električne struje stvaraju promjenjivi magnetski tok koji može inducirati druge promjenljive struje u vodičima pod njihovim utjecajem. Slika 2.1.2. Ovakva struja koja protječe kroz namot vodiča stvara koncentrirano magnetsko polje unutar namotaja. Da bi mogli magnetski tok koji se stvara u primarnom namotu prenijeti dalje koriste se feromagnetski materijali koji imaju izvrsna svojstva vođenja magnetskog toka te pomoću njih kroz jezgru takovih materijala prenosimo magnetski tok do sekundarnih namotaja. Kad magnetski tok prođe kroz sekundarne namotaje on u njima inducira promjenjivu električnu struju sličnu onoj koja stvara taj magnetski tok, ali nešto drugačijih vrijednosti ako namoti nisu istih veličina.



Slika 2.1.1. Shematski prikaz transformatora

Transformator možemo definirat kao električni uređaj koji koristi elektromagnetska svojstva kako bi promijenio električna svojstva izlaza u odnosu na ulaz s minimalnim gubicima.



Slika 2.1.2. Inducirana struja u zavoju

Transformator se sastoji od:

- primara, kojemu su namotaji spojeni na izvor električnog napajanja
- jezgre od feromagnetskog materijala, koja povezuje primar i sekundar
- sekundara, kojemu su namotaji na mjerne ili zaštitne uređaje

Razlika između primara i sekundara čini električna svojstva u njima različitima, gdje je glavna razlika u broju zavoja. transformatori su napravljeni tako da približno vrijedi:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-1)$$

- I1: Struja primara
- V1: Napon primara
- N1: Broj zavoja primara
- I2: Struja sekundara
- V2: Napon sekundara
- N2: Broj zavoja sekundara

Ova relacija nam govori prijenosni omjer transformatora i kod mjernih transformatora cilj je napraviti ovaj odnos što više točnijim te slijedeći to pristupa se i kod dizajniranja mjernih transformatora [2].

Mjerne transformatore možemo klasificirati prema [3]:

- Mjerenoj veličini (*strujni transformatori i naponski transformatori*),
- Namjeni (*transformatori za mjerenje i zaštitu*),
- Naponskoj razini (*niskonaponski, srednjenaponski i visokonaponski mjerni transformatori*)
- Izolaciji (*papirni, uljni i SF6 mjerni transformatori*)
- Tehnologiji proizvodnje (*konvencionalni i nekonvencionalni mjerni transformatori*).

2.2. Tehnički zahtjevi za mjerne transformatore

Mjerne transformatore uglavnom koristimo u elektroenergetskim sustavima i prema tome moraju zadovoljavati potrebe za mehaničkim i tehničkim karakteristikama koji se susreću u praksi, a ne samo u teoriji.

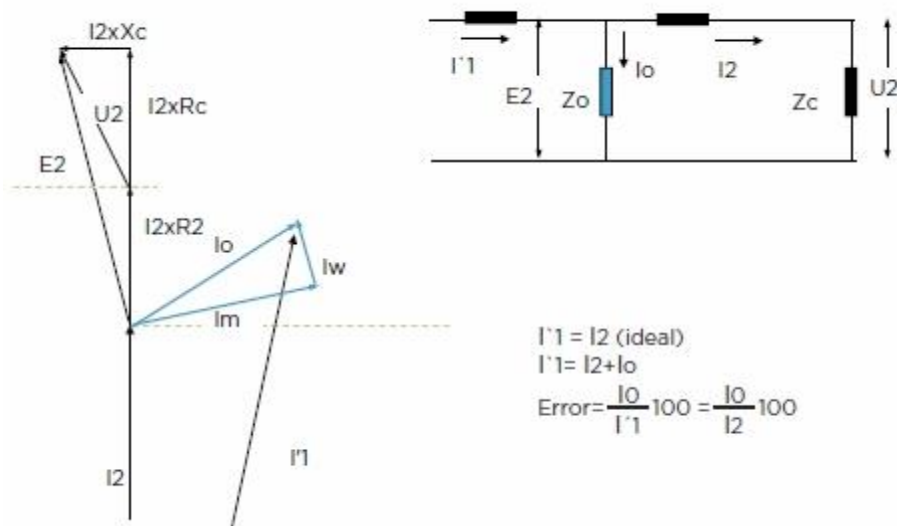
Kompromisi između zahtjeva industrije i mogućnošću dovelo je do standardizacije i dogovora između korisnika i proizvođača, a kako se povećava sve više i koordinacija među tržištima tako su zahtjevi za standardizacijom se veći.

2.2.1. Električni zahtjevi

Točnost

Točnost je jedan od glavnih zahtjeva kod mjernih transformatora. Kako postoje gubici tijekom elektromagnetske pretvorbe energije, gubici u željezu, prolazak struje kroz vodiče stvara dodatne gubitke poznate kao Joule-ovi gubici. Uslijed ovih gubitaka postoji razlika između dolazne i odlazne energije, signala tj. imamo pogrešku. Kako su napon i struja vektorske veličine, pogreška će isto biti vektorska i imamo pogrešku u modulaciji i veličini. kažemo da su to pogreške u omjeru i fazi slika 2.2.1.1.

Sva mjerenja u električnim mjerenjima nisu jednakog tipa i nemaju jednaku važnost, ne zahtijevajući time jednaku točnost. Najveća točnost je potrebna kod laboratorijskih i mjeriteljskih mjerenja gdje su bitnija kvalitetna mjerenja od količinski puno manje kvalitetnijih mjerenja.



Slika 2.2.1.1 – Vektorski prikaz pogreški

Korištenjem najmodernijih materijala i proizvodnih metoda omjer pogrešaka obično razmatramo između tri raspona mjerenja 0.1 – 0.2% za prvi tip, 0.5% za drugi tip i 1 – 3% za treći. Fazne pogreške su između 5 minuta i 1 stupnja.

Rastom distribucijskog sustava, skupa s porastom potražnje za električnom energijom više razvijenih zemalja raste i potreba za zaštitom ovakvih mreža od kvarova. Mnoga mjerenja se uzimaju u svrhu određivanja potrebe uključivanja relejne i druge zaštite. Ovo polje postaje sve više specijalizirano sa specifičnim zahtjevima za mjerne transformatore. Ti zahtjevi nemaju puno toga sa točnošću (dovoljno je ako se razina pogreške nalazi unutar tipa 2 i 3) već sa osiguravanjem brze i pouzdane prijave bilo kakvih nepoželjnih stanja.

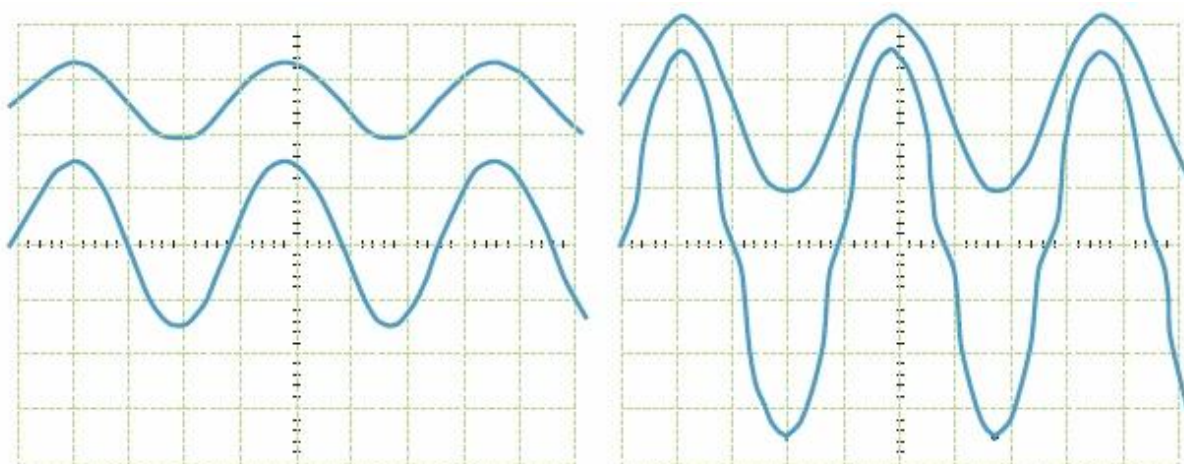
Kvarovi u električnim mrežama većinom su naponska ili strujna preopterećenja, koja su ponekad dovoljno velika za dovesti do zasićenja željezne jezgre unutar mjernog transformatora. Kad se to

dogodi izlaz na sekundaru transformatora više nije sličan sa ulazom u obliku i veličini te zaštitni uređaji spojeni na njega ne mogu vidjeti što se točno događa na primarnoj strani, strani mreže.

Zaštitni uređaji moraju usporedit izmjerena stanja s normalnim predviđenim stanjima kako bi mogli utvrditi da li je došlo do kvara. Kako bi to mogli trebaju pouzdanu informaciju o stanju na primarnoj strani iako su ona možda i mnogo viša od normalnih radnih uvjeta za koje je sustav dizajniran.

Postojeći elektroenergetski distribucijski sustav je dizajniran da održava napon što je moguće više stabilnim dok se struja mijenja ovisno o proizvedenoj i potrošenoj energiji. Ovo znači da varijacije u naponu ne bi trebale biti velike (ne više od duplo predviđenog), ali varijacije u struji mogu biti puno veće i do tisuću puta u nekim situacijama. Naponski i strujni mjerni transformatori prema tome se ponašaju različito u pogledu zaštite.

U strujnim mjernim transformatorima granica točnosti mora biti definirana, pokazivati koliko puta veća struja primara može biti izmjerena u odnosu na onu za koju je mjerni transformator projektiran (10, 20, 30). Razina pogreške mora biti ispod ovog nivoa, tj. jezgra ne smije doći do zasićenja slika 2.2.1.2



Slika 2.2.1.2. – Usporedba odziva strujnog transformatora bez i sa zasićenom jezgrom

Kod naponskih transformatora spojenih u mreži s kvarom koji za rezultat ima povišene vrijednosti napona, od njih se zahtjeva da izdrže 1.5 ili 1.9 puta nazivne vrijednosti napona do 8

sati bez gubitaka u točnosti. Ovo je zbog toga što će u radu možda bit potrebno dopustit veće vrijednosti napona za duže periode.

Zasićenje jezgre nije poželjno kod mjernih zaštitnih uređaja, ali je možda potrebno kod mjernih transformatora za mjerenje.

Mjerni uređaji su mali i dosta krhki, obično mogu podnijeti dvostruku vrijednost struje za koju su projektirani bez oštećenja, ali će bit u opasnosti ako struje budu veće od tih. Prema tome strujni mjerni transformatori su dizajnirani da dođe do zasićenja kad vrijednost struje dođe do određenog nivoa, obično 5 ili 10 puta nazivne.

Kada je jezgra zasićena iako struja primara nastavi rasti, struja na sekundaru se neće povećavati tako da će uređaji priključeni na sekundar bit zaštićeni.

Druga električna naprezanja

Osim što moraju radit svoju osnovnu funkciju mjerni transformatori moraju bit pogodni za rad na njihovoj krajnjoj lokaciji. Nekoliko dodatnih testova može se provodit ovisno o naprezanjima koje moraju podnijeti. Ovi testovi se ne provode na svim jedinicama već samo na onima koja će morat izdržati takva naprezanja npr. uređaj koji je predviđen za laboratorijska testiranja neće bit testiran na udar groma.

Tijekom svog životnog vijeka strujni mjerni transformatori će možda morat izdržat struje kratkog spoja više puta. Toplinske i dinamičke posljedice ovoga su teme mnogobrojnih testova, što ćemo kasnije vidjet.

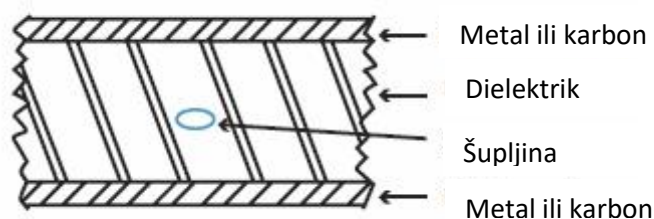
Realne električne mreže su dizajnirane za rad pri nazivnim vrijednostima napona, ali na trenutke moguće su i dvostruke vrijednosti i mogu bit održavane na kraće periode. Vrijednost i trajanje tih napona će varirati prema upotrebi i okolnostima pa se shodno tome mjerni transformatori projektiraju s većom izolacijom nego što je potrebna za nazivne vrijednosti.

Različiti standardi na snazi postavljaju generalno prihvaćene vrijednosti napona za testiranje dielektrične čvrstoće transformatora. Ovi testovi se provode na svakom individualnom transformatoru u trajanju od jedne minute. Određivanje dielektrične čvrstoće između različitih dijelova mjernog transformatora je rutinski test (*između sekundara i primara, između svakog od njih i jezgre i nakraju između zemlje. Proces se ponavlja ako je više od jednog sekundara*).

Različiti materijali i procesi proizvodnje dovode do drugačijih faza starenja i gubitaka karakteristika u mjernim transformatorima. Starenje se pokazalo da uglavnom ovisi o homogenosti materijala, kako je proizveden i elektromehaničkim utjecajima kojima je izložen. Na osnovu toga materijali moraju bit pažljivo izabrani na bazi kvalitete, jedinstvenosti i čistoće. Ovo se primjenjuje na smole, papir, ulje, trake, vodiče, magnetske ploče.

Sama proizvodnja mora bit izvedena jako pažljivo kako bi se osiguralo dobra centriranost, jednolika čvrstoća, konstantan tretman temperaturom, eliminacijom vlage i kompletnom impregnacijom. Ovo se postiže pažljivim rukovanjem i korištenjem vakuuma kod sušenja i impregnacije.

Navedeni zahtjevi se uzimaju o obzir kod dizajniranja i površine su dizajnirane sa posebno proučenim oblicima kako bi osigurali ravnoliko rasprostiranje električnih i magnetskih polja na prihvatljivu razinu. U praksi je nemoguće pronaći savršene materijale, tako se na primjer koriste različiti slojevi papira umjesto samo jednog papira iste debljine kako bi se izbjegle bilo kakva mogućnost nesavršenosti u materijalu da prodire s jedne na drugu stranu slika 2.2.1.3.

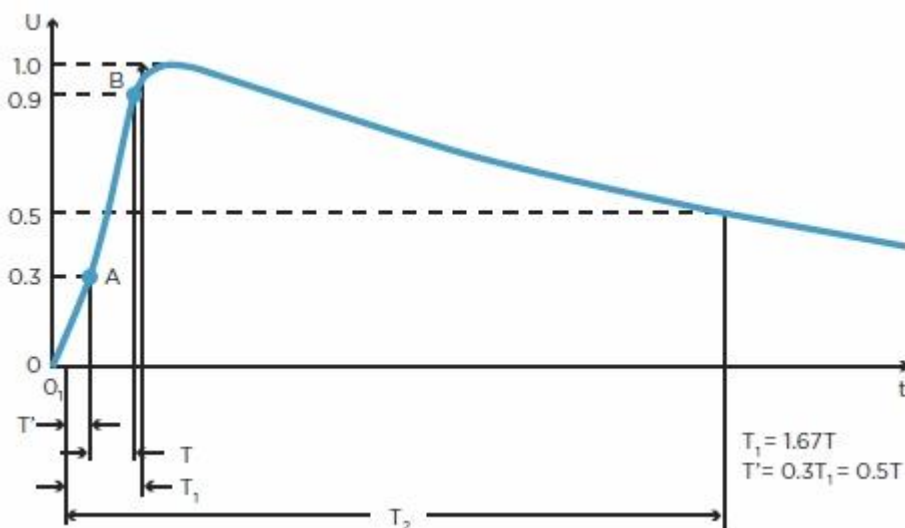


Slika 2.2.1.3. – Nesavršenost u dielektriku, šupljina

Ako ova jedinstvenosti nije postignuta, kad bi narinuli napon magnetsko polje bi bilo nejednoliko raspoređeno i određena područja bi bila pod većim stresom. U nejednolikim područjima (*grudice u papiru, mjehurići plina, zarobljena vodena para*) mogu uzrokovat malene izboje koja raskidaju i oštećuju dielektrik i njegova svojstva. Standardi i specifikacije predlažu različite načine pronalaženja ovakvih opasnih izboja i ograničavaju razinu koje mogu postići bez uzrokovanja preuranjenog starenja mjernih transformatora. Ispit koji uvid u kvalitetu izolacije se naziva test parcijalnog izboja.

Nadzemni vodovi distribucijske mreže se često znaju naći pod udarom groma što za posljedicu ima pojavu jako visokih napona (nekoliko milijuna volti), ali jako malo energije. Kad grom pogodi vod on se prostire njegovom duljinom nekad i na jako velike udaljenosti. Ako bi udarni val groma prošao kroz mjerni transformator izolacija bi doživjela ogromno naprezanje u vrlo kratkom periodu. Zbog ovoga je potrebno da mjerni transformatori mogu izdržati određeni broj udara groma, pod pretpostavkom da naponi u tim slučajevima nisu ekstremno visoki.

Tipni testovi izvođeni po različitim standardima zahtijevaju da mjerni transformatori budu izloženi određenom broju udarnih valova unaprijed zadanih polariteta, forme i veličine. Pod „tipni“ smatra se da test nije proveden na svim uređajima već na jednom od svakog modela, u uvjerenju da ako su dizajnirani i proizvedeni slično svi bi trebali imati i slične karakteristike



Slika 2.2.1.4. – Ispitni impuls udara groma

U pojedinim slučajevima ovaj test se mora izvesti po kiši, kako bi se simulirale najgore okolnosti koje se mogu dogoditi u stvarnosti.

Otvaranje i zatvaranje prekidača također može uzrokovati tranzijentne udare napona u visokonaponskoj mreži slične onima kod udara groma ali sa više energije koju treba disipirati. Ponekad je zbog toga potrebno provesti i test na udarni val prekidača.

2.2.2. Drugi zahtjevi

Mehanički zahtjevi

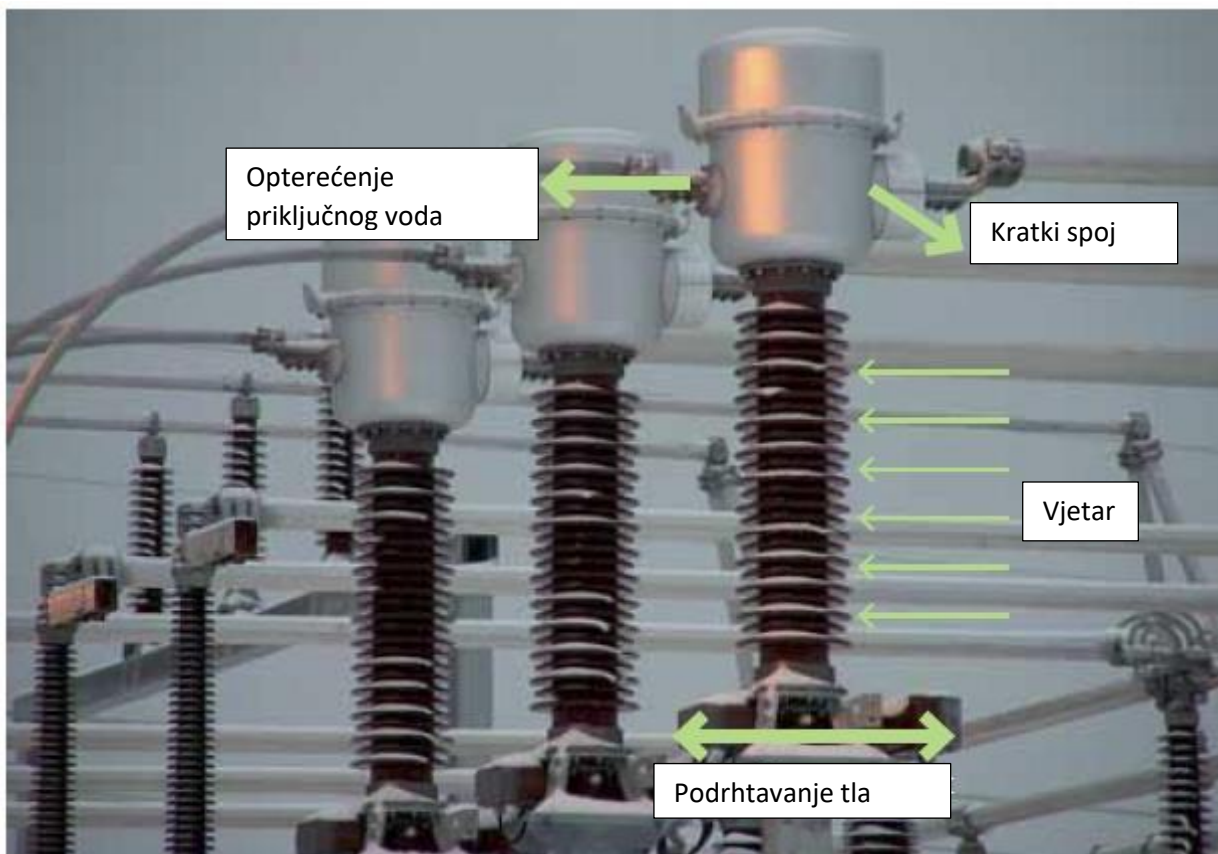
Ako postoji struja kratkog spoja u vodu na kojem se nalazi strujni mjerni transformator, kroz njegov primar će poteći vrlo jaka struja. Kad struja prolazi kroz vodič ona stvara magnetsko polje, koje je zbog velike struje kratkog spoja puno jače od onoga za koje je uređaj dizajniran. Tako velike struje prolazeći kroz primar strujnog transformatora mogu deformirati namotaje do granice razaranja kompletnog uređaja. Zbog toga kupac mora izraziti koje maksimalne struje očekuje da strujni transformator treba izdržati, kako bi se uređaj mogao shodno dizajnirati i proizvesti.

Nad uređajima se provode dinamični strujni udari na naj ne poželjnijem odnosu na svakom tipu mjernog transformatora kako bi se odredio maksimalan broj dinamičkih amper zavoja koje svaki tip strujnog transformatora može podnijeti bez opterećenja. Ovo su naravno tipski testovi.

U vanjskim postrojenjima vodovi mogu biti obješeni na izolatorima a ponekad i direktno na primar mjernih transformatora vučući ih pritom jako. Pretpostavljajući i ove situacije moraju se izvesti i testovi maksimalnog naprezanja koje je dopušteno na spojevima mjernih transformatora u različitim smjerovima.

Na lokacijama koje su izložene jakom vjetru, sila kojom vjetar djeluje se isto mora uzeti u obzir kod odabira mjernog transformatora.

U područjima s učestalim potresima mjerni transformatori moraju moći izdržati vibracijska naprezanja izazvanih potresom, za koja isto postoje testovi.



Slika 2.2.2.1. – Mehanička naprezanja na mjernim transformatorima

Toplinski zahtjevi

Svi mjerni transformatori pate od unutarnjih gubitaka koja se pretvaraju u toplinu. To su gubici uslijed Joule-ovog efekta u namotajima vodiča i gubicima jezgre uzrokovanih vrtložnim strujama i histereze. Tu su još i gubici u dielektriku uslijed puzajućih struja, koje će se povećavati dramatično i postati vrlo bitne kad temperatura poraste. Toplina mora bit disipirana u atmosferu kako bi se izbjegla oštećenja uslijed zagrijavanja i preuranjeno starenje.

Mjerni transformatori su dizajnirani da ovo rade u normalnim ali i ponekim anomalijskim situacijama predviđenima standardima. Vanjski ekološki utjecaji mogu dramatično varirati od sezone do sezone kao i od lokacije do lokacije. Maksimalna i minimalna temperatura okoliša i unutarnji maksimalni porast temperature su indicirani u standardima i tipskim testovima koja se provode pod tim uvjetima.

Ako postoje struje kratkog spoja ili druge pojave koje uzrokuju visoka strujna preopterećenja gubici uslijed Joule-ove topline postaju jako veliki te ako bi zaštitni uređaji zakazali od reagirat mjerni transformator će izgoriti. Transformatori moraju bit u stanju izdržati takva pregrijavanja bez oštećenja na kraće vrijeme (1 do 3 sekunde) kako zaštitni uređaji imali vremena od reagirat.

Ovaj toplinski efekt struja kratkog spoja u kratkom trajanju istih uzet je kod dizajniranja i uređaji su izrađeni za potrebe kupaca, korisnika, mreže i predviđenih struja kratkog spoja.

Utjecaj vremena je ovdje jako važan i mora se uzeti više okolnosti u obzir. One uključuju jako tople ili jako hladne lokacije, jaku kišu ili vlažnost zraka, lokacije gdje temperatura može varirati od jako visoke do jako niske u roku od par sati isto tako i vlažnost zraka i mnoge druge vremenske utjecaje. Sve to se mora uzeti u obzir kod svakog slučaja, u skladu s njihovim posljedicama kod dizajniranja toplinskih svojstava mjernih transformatora.

Kemijski i drugi utjecaji

Materijali korišteni kod proizvodnje mjernih transformatora moraju bit otporni na kemikalije u okolišu u kojem se nalaze. Priroda štetnih substanci se mora proučit. Korozija metalnih dijelova u vlažnim, obalnim područjima ili teško zagađenim područjima s agresivnom okolinom mogu imat posljedicu potrebu za korištenjem nehrđajućeg čelika, ili premaza.

Smole korištene za vanjsku primjenu moraju bit pomno proučene kako ultraljubičasto sučevo zračenje ne bi imalo utjecaj na njih. Ozon se formira okolo visokonaponskih dijelova pa je potrebna dostatna ventilacija kako bi se spriječilo oštećenje gume, laka, boje i drugih elemenata uslijed djelovanja ozona.

Kiša, tuča, snijeg i led stvaraju vodljive puteve preko površine izolatora, tako da su ove komponente onda napravljene sa zakrilcima različitih oblika i veličina, sa rubovima i udubljenjima kako bi spriječila nastajanje tih puteva. Prašina i ostali sumporni spojevi se mogu nadovezat na ostala atmosferska stanja i formirati blato ili kemijski agresivne spojeve.

Pješčane oluje oštećuju površinu i uništavaju zaštitni sloj, tako da se mora koristiti specijalni ili ekstra debeli zaštitni sloj.

Bilo da se ovi događaji događaju odvojeno ili zajedno, svi ovi zahtjevi znače da se mjerni transformatori moraju dizajnirati u vidu njihovog posla i lokacije.

2.3. Visokonaponski mjerni transformatori

Visoko naponski mjerni transformatori imaju zadatak osigurati mjerenje visokih napona kao i zaštitu instrumenata i ljudi od previsokih napona dodira. Naponske transformatore možemo podijeliti u dvije grupe, a to su induktivni naponski transformatori i kapacitivni naponski transformatori. Induktivni naponski transformatori su ekonomski najisplativiji za pogonske napone do približno 145kV a kapacitivni naponski transformatori iznad 145kV [4].

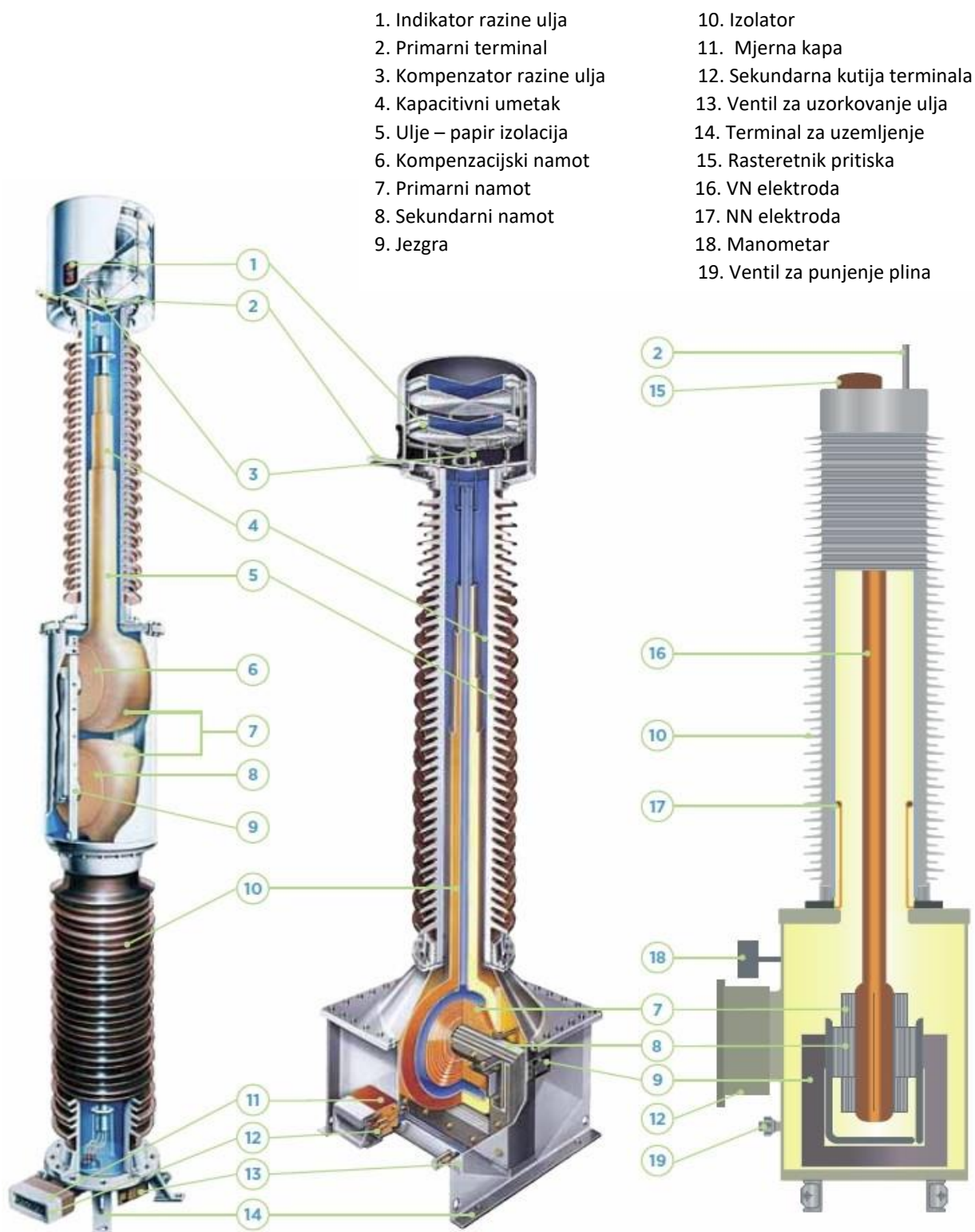
Važni glavni faktori kod odabira naponskih transformatora:

- Standard (IEC, IEEE ili nacionalni)
- Induktivni ili kapacitivni naponski transformator
- Nazivna vrijednost izolacije
- Nadmorska visina (ako je veća od 1000m)
- Nazivni primarni napon
- Nazivni sekundarni napon
- Omjer transformacije
- Nazivni faktor napona

Induktivni naponski transformator

Visoko naponski transformatori normalno su spojeni između faze i uzemljenja. Dok su jezgra i namoti uobičajeno smješteni u donjem dijelu samog transformatora.

Sa povišenjem vrijednosti primarnog napona, broj namota primarnog zavoja će se isto povećati. Što će za posljedicu imati i povećanu veličinu namota, sa proporcionalno povećanim gubitcima u namotajima, eventualno rezultirajući u mogućoj maksimalnoj voltaži na primaru, sa transformacijom u jednom koraku. Zbog ovog razloga , induktivni naponski transformatori projektirani za napone iznad 245-300kV se izrađuju kao kaskadni dizajn. Tu se u principu, dva naponska transformatora spojena u seriju, gdje je sekundarna strana prvoga spojena na primarnu stranu drugog naponskog transformatora. Ovaj problem nije toliko izražen kod SF6 izoliranih naponskih transformatora, gdje je izolacijski volumen primarnog namotaja manji. Na slici 2.3.1 možemo vidjeti sastavne dijelove i položaj istih kod naponskih transformatora.



Slika 2.3.1 – Induktivni visokonaponski mjerni transformator > Ulje – papir izolacija i SF6

U usporedbi između kapacitivnih i induktivnih naponskih transformatora postoje dva trenda. Većina korisnika preferira kapacitivni tip gdje je slabije zastupljena alternativa u induktivnim

transformatorima sa kaskadnim dizajnom zbog manjih troškova. Argument za ovo je, posebno kod ranijih kapacitivnih transformatora, postojanje problema prenapona koji je probijao kapacitivne elemente, mijenjajući kapacitivni odnos, a sa time i točnost. Kod moderno dizajniranih kapacitivnih naponskih transformatora, koji su pravilno zaštićeni zink-oksidi odvodnicima prenapona, ovaj problem nije prisutan.

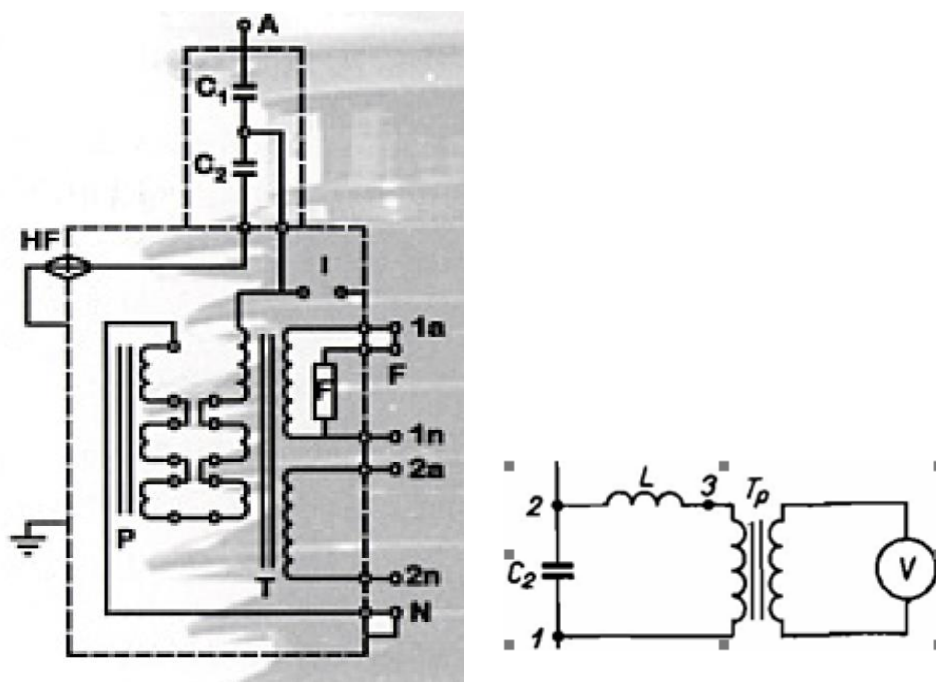
Kapacitivni naponski transformator

Kod kapacitivnih naponskih transformatora, transformacija se odvija u dva koraka. Prvi korak je odrađen od strane kapacitivnog djelitelja napona, koji smanjuje primarni napon na posrednu razinu, otprilike $22/\sqrt{3}$ kV. Drugi korak transformacije obavlja induktivni naponski transformator, sa posredne razine napona [4].

$$\text{Omjer kapacitivnog djelitelja je: } K1 = \frac{C1+C2}{C1} = \frac{E1}{E2} \quad (2-2)$$

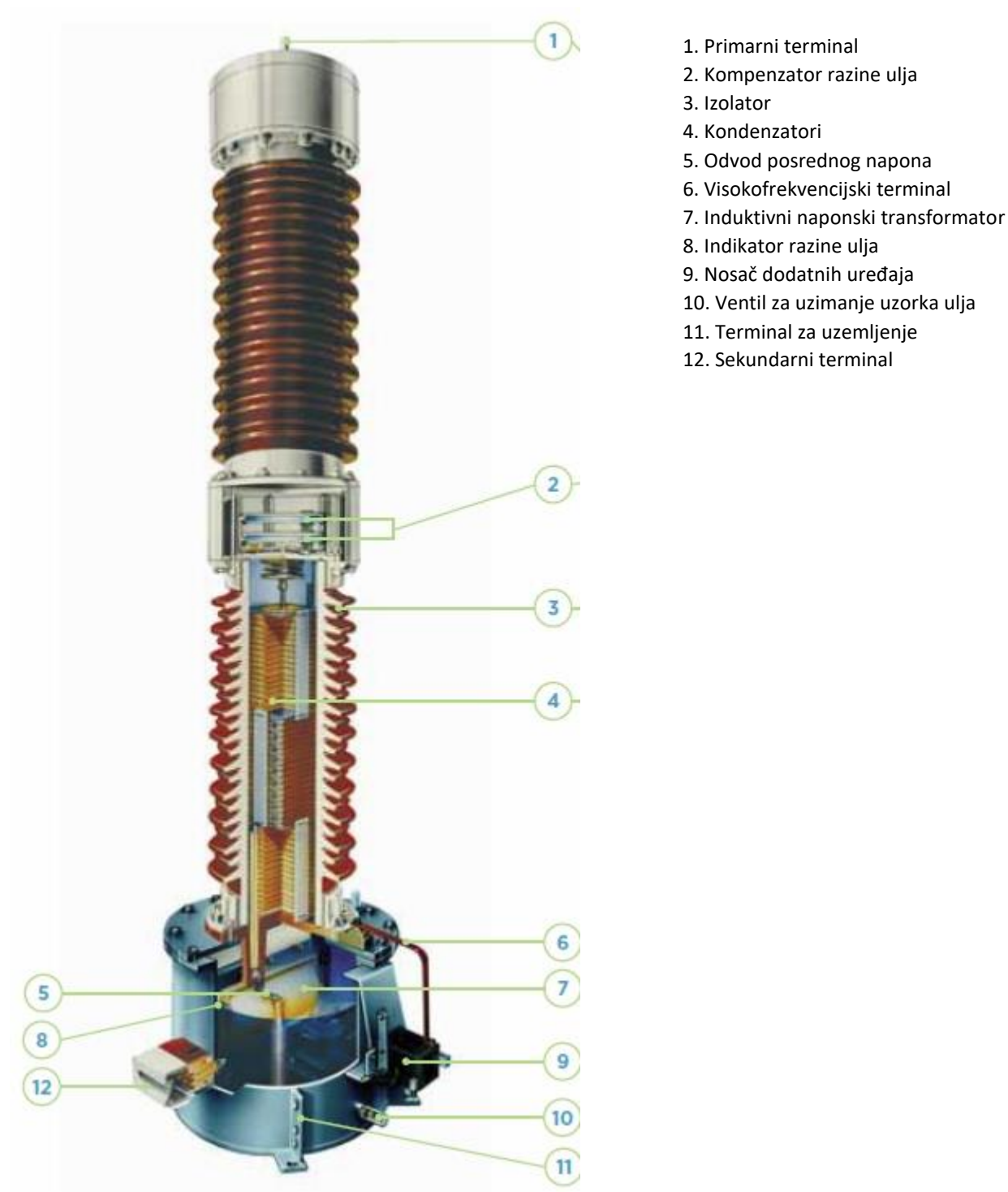
$$\text{Omjer posrednog naponskog transformatora je: } K2 = \frac{E2}{E3} \quad (2-3)$$

$$\text{Krajnji omjer je: } K = K1 \times K2 \quad (2-4)$$



Slika 2.3.2. – Nadomjesna shema kapacitivnog naponskog transformator

Na slici 2.3.3 prikazani su dijelovi i raspored istih kod kapacitivnog naponskog transformatora.



Slika 2.3.3 – Kapacitivni visokonaponski mjerni transformator

3. Nekonvencionalni mjerni transformatori

Pod pojmom konvencionalni mjerni transformatori obično smatramo mjerenje struje i napona koristeći transformatore sa željeznom jezgrom. Njihov dizajn dosegao je optimum i nije se značajno mijenjao tijekom zadnjih par desetljeća. Sa razvojem elektroničkih uređaja i primjenom elektroničkih krugova u svim aspektima današnjeg života, jedna od njihovih glavnih mana izašla je na vidjelo, a radi se o nekompatibilnosti sa modernom opremom za mjerenja.

Ovo je jedan od glavnih razloga zašto tako zvani nekonvencionalni mjerni transformatori dobivaju sve više pozornosti zadnjih par godina. Nekonvencionalni mjerni transformatori su uglavnom transformatori bez feromagnetske jezgre ili oni koji umjesto standardne željezne jezgre koriste druge materijale koji imaju bolju reakciju na brzo promjenljive signale.

Kao sastavni dijelovi mjernih uređaja koriste se i različiti električni sklopovi koji su najčešće i integrirani u sam nekonvencionalni mjerni transformator. Ovakva fleksibilnost u dizajnu pruža punu kompatibilnost sa modernim digitalnim mjernim uređajima i otvara mogućnosti za mnoge primjene [5].

Tehnologija korištena u nekonvencionalnim mjernim transformatorima varira između proizvođača i modela. Jedna od prednosti koja se dijeli između više modela je ta da su oni generalno gledajući značajno manji u veličini za razliku od njihovih konvencionalnih modela, kako u težini tako i u veličini. Ovo smanjenje u veličini najčešće je omogućeno korištenjem optičkih vlakana u prijenosu, te se visokonaponska izolacija može pojednostaviti.

Princip optičkog mjerenja koji se smatra najizvodljivijim za nekonvencionalne mjerne transformatore zasniva se na Faraday-evom efektu. Princip je baziran na promjeni u fazi u linearno polariziranom svjetlu kad ga izložimo magnetskom polju. Pockels-ov efekt, koji se koristi za mjerenje napona je sličan budući da se on zasniva na pomaku faze između dva ortogonalno orijentirana linearno polarizirana svjetla izložena električnom polju.

Druge tehnologije korištene u nekonvencionalnim mjernim transformatorima djelomično primjenjuju tradicionalne tehnike mjernih transformatora, ali njihovi sekundarni izlazi mogu biti analogni sa nižim vrijednostima od konvencionalnih transformatora ili mogu u nekom djelu biti digitalizirani unutar samog transformatora. U mnogim dizajnima koriste se optička vlakna za

prijenos signala do kontrolne sobe. Ovaj dizajn pojednostavljuje izolaciju jer optičko vlakno samo po sebi ne provodi struju u odnosu na električne vodiče [6].

Nekonvencionalni mjerni transformatori danas su dostupni kao komercijalni proizvodi na tržištu gdje im je najveći ograničavajući problem spajanje novih transformatora sa postojećom opremom u postrojenjima. Zbog ovoga je tržište za nekonvencionalne mjerne transformatore limitirano na lokacije gdje se izgrađuje kompletno novo postrojenje. Drugi ograničavajući faktor na početku je bio nedostatak standardizacije sekundarnih izlaza otežavajući kombiniranje uređaja različitih proizvođača. Uvođenjem standarda IEC 61850 to se mijenja i nekonvencionalni mjerni transformatori imaju sve veću primjenu.

U teoriji nekonvencionalni mjerni transformatori pružaju zaštitnim i upravljačkim uređajima ne distorzirane replike primarnih signala na taj način obećavajući prednosti u vidu poboljšane sigurnosti, manje veličine, imunosti na elektromagnetske smetnje, bolji prijelazni odgovor, širi raspon frekvencije, veći dinamički raspon i veća preciznost u odnosu na tradicionalne analogne sustave.

Nekonvencionalne tehnologije postoje sa ciljem zamjene tradicionalnih mjernih transformatora za mjerenje na srednje i visoko naponskim dalekovodima te iako pokazuju velika obećanja u pružanju lakih i preciznih uređaja za mjerenje struje i napona, još uvijek im nedostaje određena razina preciznosti potrebne za tu primjenu.

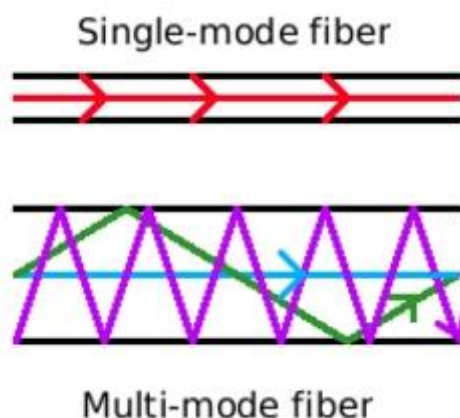
3.1. Optički kabel

Za prijenos informacija i komuniciranje nekonvencionalni mjerni transformatori koriste najčešće optičke vodove i sklopove koji se oslanjaju na tehnologiju optičkih vlakana.

Optičko vlakno je prozirna nit, najčešće izrađena od stakla ili polimernog materijala debljine nešto veće od vlasi ljudske kose. Optička vlakna se koriste za prijenos svjetla između dva kraja optičkog vlakna i pronalaze široku upotrebu gdje su potrebne komunikacije na velike udaljenosti sa velikom propusnošću, znatno većim nego kod običnih žičanih vodiča. Optička vlakna se koriste umjesto metalnih vodiča jer signal putuje duž njih uz manje gubitke, a dodatno još su imuni na elektromagnetske smetnje što posebno dolazi do izražaja kod mjernih transformatora

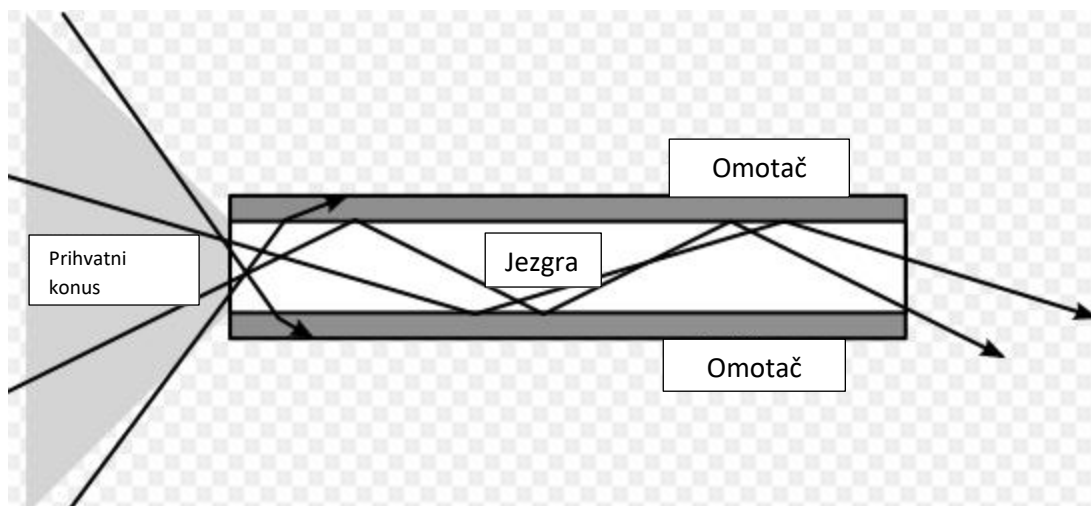
koji rade sa velikim vrijednostima struje i napona koja stvaraju snažna elektromagnetska polja [7].

Optička vlakna tipično se sastoje od jezgre obložene prozirnim omotačem sa nižim indeksom refrakcije. Svjetlo je zadržano unutar jezgre pojavom totalne unutarnje refleksije koja uzrokuje da se vlakno ponaša kao vodič valova. Vlakna koja podržavaju više puteva prenošenja signala nazivaju se MMF (*Multi-mode fibers*), dok se ona koja podržavaju samo jedan put nazivaju SMF (*Single-mode fibers*) slika 3.1.1 [8].

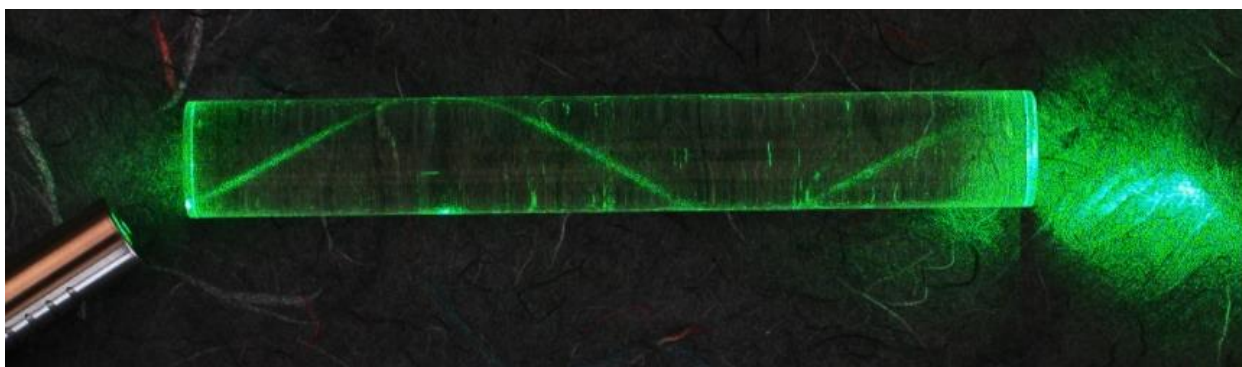


Slika 3.1.1 – Prijenos signala u SMF i MMF optičkom vlaknu

Kada svjetlo koje putuje kroz optički gust medij udari o granicu pod nekim strmim kutom (većim od kritičnog za granicu), svjetlo će se u potpunosti reflektirati. Ovo se naziva totalna unutarnja refleksija. Ova pojava se koristi u optičkim vlaknima kako bi se svjetlo zadržalo unutar jezgre. Svjetlo putuje kroz optičku jezgru, odbijajući se naprijed i nazad o granicu između jezgre i omotača. Zbog toga što svjetlo mora udariti o granicu pod kutom većim od kritičnog, samo svjetlost koja uđe u optičko vlakno sa određenim rasponom kuta može putovati optičkim vodom bez curenja van. Ovaj raspon kuta se zove prihvatni konus optičkog vlakna. Veličina prihvatnog konusa je funkcija razlike refrakcijskog indeksa između jezgre i omotača. Drugim riječima postoji maksimalan kut u odnosu na os optičkog vlakna pod kojim svjetlost može ući kako bi putovala duž jezgre optičkog vlakna slika 3.1.2 [7].

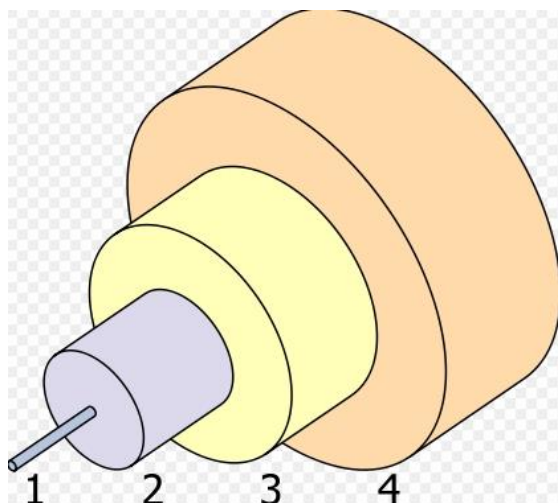


Slika 3.1.2



Slika 3.1.2 – Odbijanje lasera duž akrilni štap, ilustrirajući totalnu unutarnju refleksiju svjetla

Svaki optički vodič sastoji se od 4 glavne komponente, sloja: jezgre vlakna, omotača jezgre, ublaživač, vanjske ljuske prikazano na slici 3.1.3. Sama jezgra ima visoka reflektirajuća svojstva i debljine je od $8\mu\text{m}$, omotač oko jezgre je promjera $125\mu\text{m}$, promjer ublaživača $250\mu\text{m}$ i promjer vanjske ljuske debljine $400\mu\text{m}$.



1. Jezgra
2. Omotač
3. Ublaživač
4. Vanjska ljuska

Slika 3.1.3

Brzina kojom se svjetlost prenosi putem optičkih vlakana je vrlo velika i iznosi oko 200 000 km/s, a prijenos podataka teoretski može iznositi i preko 50 000 Gbit/s, ali za to je potrebno dodatno razviti dodatnu opremu kako bi se mogla iskoristiti puna brzina i potencijal optičkih vlakana. Trenutne brzine su oko 10 Gbit/s do 40 Gbit/s, a signal se može prenijeti na udaljenosti od 80 do 140 km bez potrebe za regeneracijom signala [3].

Prednosti optičkih vlakana u odnosu na metalne vodiče:

- široka propusnost
- imunitet na elektromagnetske smetnje
- mali gubici signala na velikim udaljenostima
- ne provodi struju
- trošak proizvodnje i prevencija krađe
- sigurnost informacija koje se prenose vodom
- mala težina i manje dimenzije
- mehanička fleksibilnost

3.2. Optički senzori

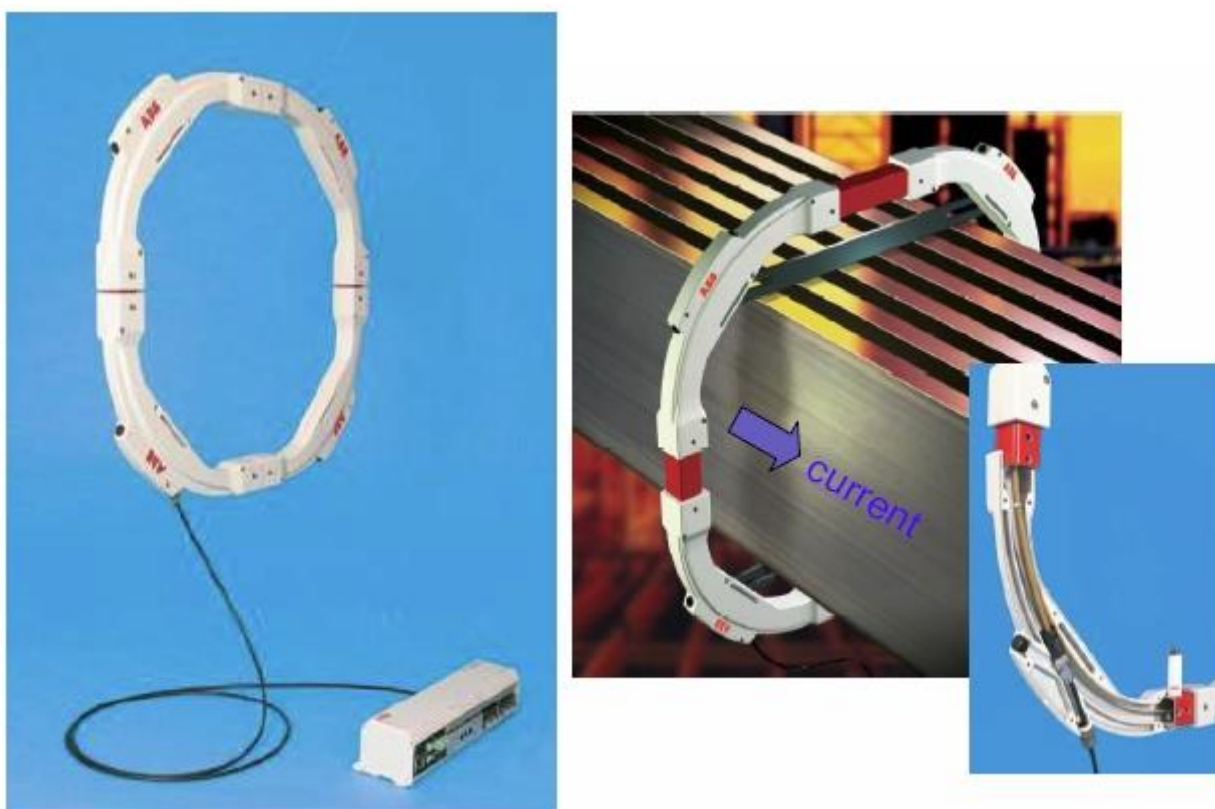
Optički senzori najčešće koriste jedan od dva princip za mjerenje, Faradejev efekt za mjerenje struje i Pockelsov efekt za mjerenje napona. Treba napomenuti kako trenutni senzori za mjerenje struje koji se baziraju na Faradajevom efektu imaju premalu osjetljivost za praktičnu primjenu, teški su za implementirati na točan i precizan način i mogu bit prihvatljivi samo za vodove na visokim naponima. Jedna od glavnih prednosti optičkih senzora je ta da postoji optički signal na njihovom izlazu što ih čini jako pogodnima za korištenje u modernim sustavima gdje se koristi mnogo optičkih vlakana. Za razliku od Rogowski svitka optički senzori nisu osjetljivi na magnetska polja koja ih okružuju te su manji i više kompatibilni kod potreba za moderne pametne mreže. Njihova ne provodljiva priroda čini ih električki pasivnima, što kombinirajući njihovu kemijsku inertnost čini odličnim izborom za mjerenja u korozivnim i eksplozivnim okolišima. Generalno optički senzori ne dolaze do zasićenja i imaju linearni izlazni signal u odnosu na Rogowski svitak.

Optički senzori su lagane konstrukcije što pridonosi kod proizvodnje prijenosne opreme, ali i kolektorima koji sadrže sve ostale popratne električne komponente, na taj način ne trebajući bit smješteni pored mjesta mjerenja pogotovo ako se koriste optički vodovi. Ovo je jako korisno kod mjerenja struje pri visokim naponima. Ne samo radi lakšeg smještaja opreme i kasnijeg manipuliranja njome, već i zato što je elektronika senzora na razini zemlje odvojena od osjetnih optičkih vlakana na visokim naponima. Lako se mogu koristiti za daljinska upravljanja i inspekcije na velikim udaljenostima.

Od ostalih pozitivnih svojstava su široka propusnost i mogućnost za postizanje velike preciznosti kod mjerenja struje, ali isto tako postoje i neke negativne strane ove tehnologije. Jako su osjetljivi na vibracije, temperaturu i druge klimatske uvjete, povećavajući kompleksnost ako se ugrađuju na otvorenom. Visoki troškovi proizvodnje, zbog velike potražnje za materijalima i kompleksna proizvodnja otežavaju masovnu proizvodnju [5].



Slika 3.2.1 – Strujni mjerni transformator sa optičkim senzorom



Slika 3.2.2 – Primjer izvedbe – ABB strujni senzor od optičkih vlakana

3.2.1. Faradejev efekt

U fizici Faradajev efekt je magnetno-optički efekat koji je interakcija između svjetla i magnetskog polja u mediju. Faradejev efekt uzrokuje rotaciju polarizacijske ravnine koja je linearno proporcionalna komponenti magnetskog polja u smjeru širenja.

Otkrivena je od strane Michaela Faradeja u 1845g. i ona je prvi eksperimentalni dokaz da su svjetlost i elektromagnetizam povezani. Efekt se pojavljuje u većini optički transparentnim dielektričnim materijalima, uključujući tekućine, pod utjecajem magnetskog polja.

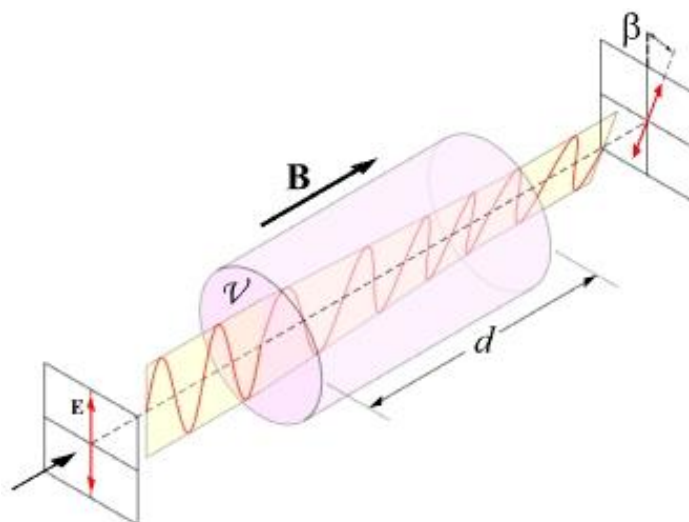
Faradajev efekt je uzrokovan lijevo i desno kružno polariziranim valovima koji se šire različitim brzinama. Kako se linearna polarizacija može raščlaniti na superpoziciju dvije jednake amplitude kružno polarizirane komponente različitih smjerova i različitih faza, efekt relativnog faznog pomaka, induciranog Faradajevim efektom, je da rotira orijentaciju valove linearne polarizacije.

U kružno polariziranom svjetlu smjer električnog polja rotira na frekvenciji svjetla, u smjeru kazaljke na satu ili obrnuto. Ovo električno polje u materijalu uzrokuje silu na nabijene čestice od kojih je materijal napravljen. Uslijed toga gibanje će bit kružno i nabijene čestice koje se kružno gibaju stvorit će svoje vlastito magnetsko polje uz već prisutno vanjsko magnetsko polje. Ovdje možemo vidjet dva različita slučaja: stvoreno polje će bit paralelno sa vanjskim poljem za jedan smjer polarizacije i suprotnog smjera za drugi smjer polarizacije. Tj. ukupni magnetski tok polja je pojačan u jednom smjeru, a smanjen za suprotni smjer. Ovo mijenja dinamiku interakcije za svaki snop svjetla i jedan od snopova će bit usporen više nego drugi uzrokujući fazni pomak između lijevo i desno polariziranog snopa. Kad se dva snopa zbroje nakon faznog pomaka, rezultat je opet linearno polarizirani snop, ali sa rotacijom u smjeru polarizacije. Smjer polarizacijske rotacije ovisit će o svojstvima materijala kroz koji je svjetlost usmjerena [9].

Relacija između kuta rotacije polarizacije i magnetskog polja u transparentnom materijalu je:

$$\beta = \nu B d \quad (3-1)$$

Gdje su: β kut rotacije u radijanima, B magnetski tok u smjeru širenja u Teslama, d duljina puta u metrima na kojem svjetlo i magnetski tok imaju interakciju, ν Verdetova konstanta za materijal slika 3.2.1.



Slika 3.2.1 – Polarizacijska rotacija uslijed Faradejevog efekta

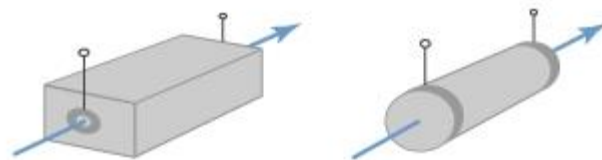
3.2.2. Pockelsov efekt

Pockelsov efekt mijenja ili stvara dvostruku refrakciju u optičkom mediju induciranog sa električnim poljem. Kod Pockelsovog efekta dvostruka refrakcija je proporcionalna električnom polju. Efekt se pojavljuje samo u kristalima kojima nedostaje inverzna simetrija, kao što su litij niobate, galijev arsenid i drugi ne centralno simetričnim medijima kao što su električnim poljem polarizirani polimeri ili stakla [10].

Pockelsove ćelije je uređaj koji se sastoji od elektro optičkog kristala sa priključenim elektrodama kroz koji se svjetlosni snop može širit. Fazno kašnjenje unutar kristala, Pockelsov efekt, može modulirati primjenom promjenjivog električnog napona. Tj. Pockelsove ćelije se onda ponašaju kao naponski kontrolirana valna ploča.

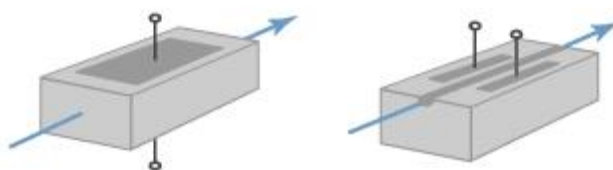
Pockelsove ćelije mogu imati dvije različite geometrije s obzirom na smjer primijenjenog električnog polja:

- Uzdužne kod kojih je električno polje u smjeru svjetlosnog snopa, koje prolazi kroz rupe u elektrodama. Veliki otvori mogu lako bit realizirani , jer je potrebni napon drivera neovisan o otvoru. Elektrode mogu bit metalni prstenovi ili transparentni slojevi na krajevima sa metalnim kontaktima slika 3.2.2.1 [11].



Slika 3.2.2.1 – Pockelsove ćelije s uzdužnim električnim poljem

- Poprečne kod kojih je električno polje okomito na svjetlosni snop. Polje je primijenjeno kroz elektrode na stranama kristala. Za male otvore, mogu imati male napone prebacivanja slika 3.2.2.2 [L11].



Slika 3.2.2.2 – Pockelsove ćelije s poprečnim električnim poljem

3.3. Rogowski svitak

Najpopularniji senzor za mjerenje struje je Rogowski svitak. Rogowski svitak ne sadrži nikakve feromagnetske jezgre što omogućuje mjerenje struje u širokom rasponu. Koristeći isti svitak moguće je izmjeriti struje veće od 1 MA i male reda nekoliko mA. A mjerenje struje je linearno kroz cijelu širinu raspona zbog ne postojanja jezgre koja može doći do zasićenja.

Njihov princip mjerenja se zasniva na osjetu magnetskih polja koje stvara struja, što znači da se ne mogu koristiti za mjerenje istosmjernih struja. Raspon frekvencija je približno od 0.1 Hz pa sve do 1 GHz, pa sa njima možemo mjeriti izmjenične i prijelazne struje [5].

Rogowski svitak je malen, kompaktan, lagan i njegova potrošnja energije je jako mala, što čini mjerenja struje na krugovima visokog napona laganima i sigurnima jer ne postoji električna veza između svitka i mjenjenog kruga. Rogowski svitak ne prouzrokuje smetnje u sustavu u kojem se vrši mjerenje, jer ne vuče potrebnu energiju iz glavnog kruga, a induktivitet dodan u krug zbog prisustva zavojnice je svega par pH.

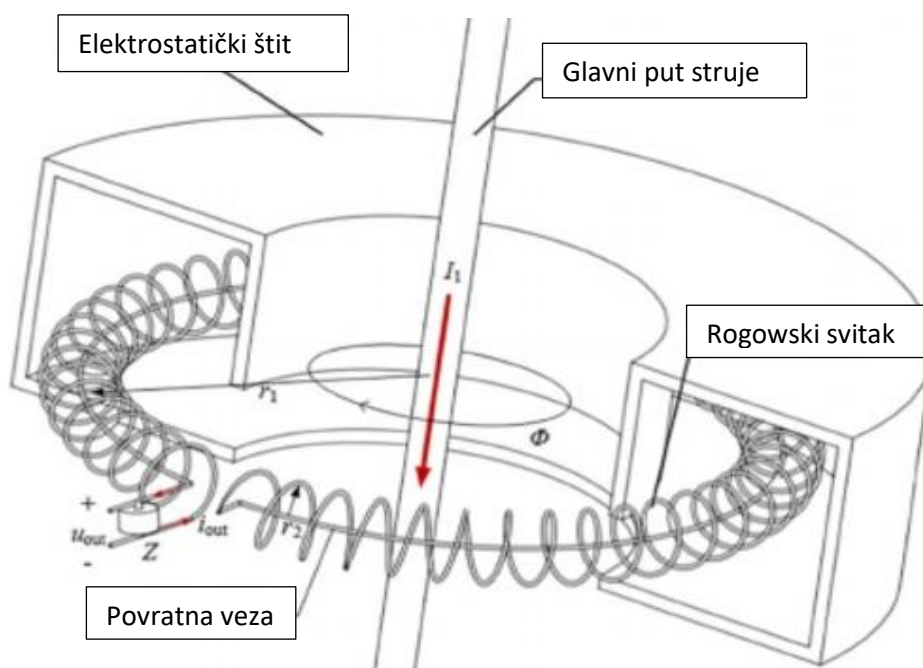
Nadalje, ove zavojnice ne zahtijevaju nikakvo održavanje osim periodičnih pregleda na fizička oštećenja ako su svitci izloženi grubom okolišu. Mogu se kalibrirati na bilo kojoj pogodnoj

vrijednosti struje a poslije koristiti na bilo kojoj drugoj razini, uključujući i jako velike struje. Ne prouzrokuju oštećenja uslijed velikih preopterećenja.

Uzimajući u obzir da se isti uređaj može koristiti za mjerenja struje, kontrolu i zaštitu, te ima jeftinu cijenu, potpuno je jasno zašto se Rogowski svitak koristi. Ali isto tako postoje i neki nedostaci u odnosu na druge uređaje za mjerenje.

Jedan od glavnih nedostataka je osjetljivost na druga prisutna elektromagnetska polja u blizini svitke, stvarajući potrebu za nekom vrstom zaštitnog kućišta. Njihov izlazni signal je vrlo malen što traži ispravno uzemljivanje i štice. Napon na izlazu zavojnice je reda nekoliko μV za primarne struje ispod 100 A. Ali u isto to vrijeme, tako mala osjetljivost može se iskoristiti i kao prednost u nekim primjenama. Mjeriteljske pogreške su tipično u razredu od 5-20% od nazivne struje, ali postoje neka rješenja koja povećavaju njihovu točnost gdje je onda pogreška reda 0.5-5%. Ovaj problem je djelomično riješen dizajniranjem Rogowski svitka na štampanoj pločici, koje imaju bolju preciznost 0.2-0.5% i veći imunitet na vanjska polja u odnosu na klasične Rogowski svitke, a u isto vrijeme njihovi izlazni naponi su niži [5].

Još jedan od nedostataka je potreba za integratorom za veliku veličinu mjerenja, koji će dodatno utjecati na točnost i stabilnost Rogowski svitka. A/D konverzije i prijenos podataka se uobičajeno izvode na lokaciji mjerenja što može biti ne praktično u nekim situacijama. To isto znači da ako su sve ove električne komponente na lokaciji visokog napona, zahtijevaju dodatni izvor napajanja.

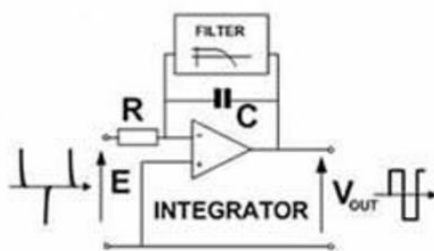


Slika 3.3.1 – Rogowski svitak

Princip rada Rogowski svitka

Promjenjiva ili pulsirajuća struja u vodiču stvara magnetsko polje i interakcija ovog magnetskog polja i Rogowski svitka stvara porast induciranog napona unutar samog svitka koji je proporcionalan stopi promjene struje koju mjerimo. Pretpostavimo li da svitak tvori zatvoren krug bez ikakvih prekida, možemo pokazati da napon E induciran u svitku je proporcionalan stopi promjene okružene struje I prema relaciji $E = H \frac{dI}{dt}$, gdje je H , osjetljivost svitka u (Vs/A), proporcionalan sa $N \cdot A$ (N -broj zavoja, A -konstantni poprečni presjek).

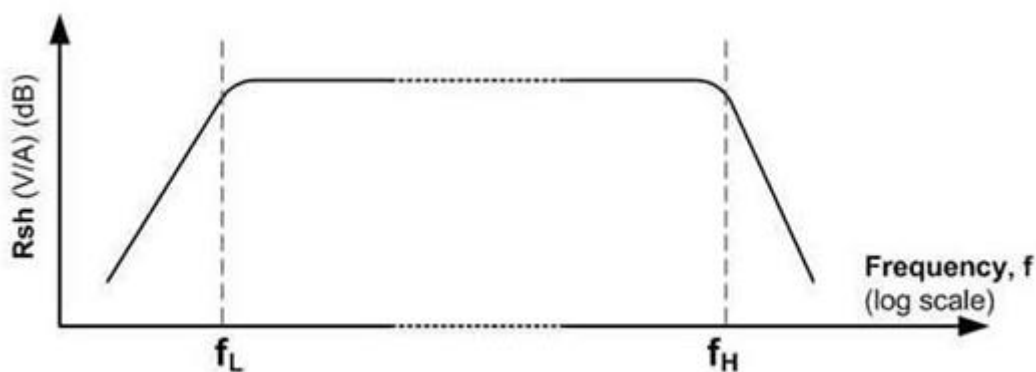
Kako bi se dobio izlazni napon V_{OUT} proporcionalan sa I , potrebno je integrirati napon svitka E , zato ubacujemo elektronički integrator kao bi nam omogućio propusnost i ispod 1 Hz. Integrator je u najjednostavnijem obliku, sa ulaznim otpornikom R_{sh} i povratnim kondenzatorom C te imaju izlaz $V_{OUT} = \left(\frac{1}{CR}\right) \int E dt$. Ukupno pojačanje pretvornika je dano sa $V_{out} = R_{sh}I$, gdje je $R_{sh} = H/CR$ osjetljivost pretvornika (V/A) slika 3.3.2. [13]



Slika 3.3.2 – Integrator

Relacija V_{OUT} proporcionalnog sa I je važeća kroz cijeli raspon propusnosti pretvornika. Raspon je definiran kao domet frekvencija od f_L do f_H za koje se sinusoidalne struje mogu izmjeriti unutar 3 dB od specificirane osjetljivosti R_{sh} .

Pri niskim frekvencijama pojačanje pretvornika se povećava i u teoriji će postati beskonačan kako se frekvencija približava nuli. Ovo bi rezultiralo u neprihvatljivom dc zanošenju i nisko frekvencijskoj buci, zbog toga pojačanje integratora mora biti ograničeno na nižim frekvencijama. Ovo ograničenje se postiže ubacivanjem nisko propusnog filtra u paralelu sa integriranim kondenzatorom. Nisko propusni filter postavlja propusnost niske frekvencije f_L , tipično je manji od 1 Hz slika 3.3.3.



Slika 3.3.3 – Raspon odziva frekvencija za Rogowski svitak i integrator

Dodatno, uslijed distribuiranog induktiviteta i kapaciteta Rogowski svitka postoji visoko frekvencijski raspon f_H , (1 MHz i veći) iznad kojeg je mjerenje umanjeno i pojavljuje se značajno fazno kašnjenje. Propusnost elektroničkog integratora i duljina vodiča koji spajaju integrator sa zavojnicom isto utječu na ovo ograničenje [13].

Prednosti korištenja Rogowski svitka:

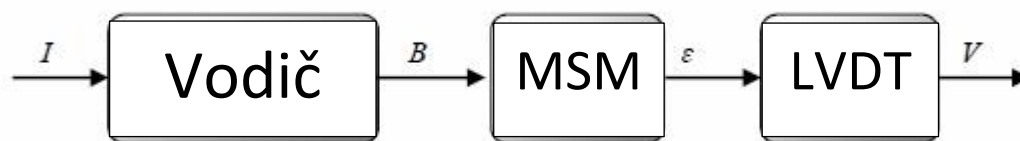
- jednostavno postavljanje
- veličina svitka nije ovisna veličini struje koja se mjeri
- nenametljivi (induktivitet dodan u krug zbog prisustva zavojnice je svega par pH)
- široki raspon propusnosti, idealno za mjerenje kvalitete snage i složenih valova
- uglavnom sigurni, nema otvorenih sekundarnih krugova
- galvanski izolirani
- izvrsna linearnost, nemaju magnetsku jezgra koja može doći do zasićenja
- mogu izdržati visoke struje preopterećenja bez da budu oštećeni
- imuni na DC struje

3.4. Pametne legure

Legure sa memorijom magnetskog oblika (*MSM – Magnetic shape memory*) su relativno novi pametni materijali koji mijenjaju svoj oblik kad su izložene vanjskom magnetskom polju. Ni-Mn-Ga legure su najčešće proučavane MSM legure koje su pokazale da imaju enormno veliki potencijal za korištenje u aktuatorima i senzorima. MSM legure imaju izuzetan magnetskim poljem inducirano istezanje, teoretski maksimalna vrijednost varira, ovisi o mikro strukturi

materijala od 6% za većinom proučavane pet slojno moduliranih do 12% za ne modulirane. One su najmanje za jedan red veličine veće od maksimalnog istezanja proizvedenih konvencionalnim magnetostriktivnih i piezo električkih materijala dosežući istezanje dobro poznatih legura sa toplinski oblikovanom memorijom. Ipak MSM legure se odazivaju na pobudu magnetskim polje znatno brže i predviđa se da će imati jako dugo vrijeme zamora ako budu postignuti određeni radni uvjeti. Očito je iz njihovih reverzibilnog svojstva da MSM legure se mogu koristiti i kao pozicionjski i kao senzori napreznja [5].

Osnovni rad senzora struje baziranog na MSM leguri oslanja se na proporcionalnost istezanja prouzrokovanim od MSM elementa koje je podvrgnuto magnetskom polju koje je prouzrokovano strujom čija se veličina mjeri. Ovo je shematski prikazano na slici 3.4.1 na kojoj izlazni napon V generiran od strane LVDT (*Linear variable differential transformer*) je proporcionalan istezanju, ϵ prouzrokovano MSM elementom. Ovo MSM istezanje je proporcionalno magnetskom polju B koje je ultimativno proporcionalno struji u vodiču I .



Slika 3.4.1 – Shema predloženog sistema mjerenja struje baziranog na MSM legurama

Sustav senzora sastoji se od MSM elementa i spojenog LVDT-a. Magnetsko polje B prouzrokovano strujom I u vodiču je konvertirano u volumen MSM elementa ϵ koje mijenja izlazni napon V na LVDT-u. Ovaj pristup dopušta mjerenje vrlo visokih struja izdaleka esencijalno mjereći magnetsko polje stvoreno tim strujama.

Glavni nedostatak MSM baziranih strujnih mjerenja pripisujemo temperaturnoj osjetljivosti i magnetno mehaničkoj histerezi trenutno dostupnih MSM legura.

Pred MSM legurama su još mnogi izazovi i daleko je od realnog prototipa i testiranja na terenu. To uključuje magnetno-mehaničku stabilnost i termo-mehaničku stabilnost MSM materijala pod različitim uvjetima okoliša te postizanje visokog nivoa linearnosti između svakog stadija u predloženoj shemi sistema mjerenja.

3.5. Strujni mjerni transformator na bazi optičkih vlakana

Novo razvijeni strujni mjerni transformatori na bazi optičkih vlakana pružaju značajna poboljšanja nad konvencionalnim strujnim transformatorima i direktno komponiraju digitalne sabirnice za komunikaciju u visokonaponskim podstanicama. Ovaj novi dizajn nadmašuje magnetske strujne transformatore u sigurnosti pri radu, mjerenju struje i frekvencijskom rasponu, uštedi na težini i manje je štetan za okoliš. Brzi odaziv optičkih mjernih transformatora i precizna mjerenja izmjenične i prijelazne istosmjerne struje rezultira u poboljšanoj zaštiti i nadzornim mogućnostima podstanica. Digitalno sučelje optičkih mjernih transformatora dizajnirano je za IEC 61850-9-2LE standard komunikacije za integraciju u digitalni sustav podstanice.



Slika 3.5.1 - Primjer izvedbe - ABB strujni mjerni transformator na bazi optičkih vlakana (FOCS-FS)

Ovaj strujni mjerni transformator na bazi optičkih vlakana projektiran je za visokonaponske podstanice nazivnog napona od 245 kV do 800 kV i dizajniran je kao 3-fazni senzor gdje je jedan dio suvišan, slika 3.5.2 (lijevo), sastojeći se od dva optoelektronička (OE) modula, tri osjetne glave i tri optička voda između njih. OE moduli sadržavaju optoelektroničke elemente za ispitivanje optičkih zavojnica (3 faze). Svaka osjetna glava sadrži dvije zavojnice od optičkih vlakana kako bi se omogućila redundancija na sistemskom nivou. Konektori optičkih vlakana na optoelektroničkim modulima olakšavaju instalaciju jer nema poslije spajanja na terenu. Dva optička voda do zavojnica zaštićena su posebnim kabelom postavljenim unutar šupljeg izolatora čiji je volumen ispunjen dušikom. Kabel vodi sve do zemlje kroz plinoviti volumen i napušta

izolatorski stup kroz plinotijesni izlaz. Optoelektronički elementi su pričvršćeni na noseći stup jednog od 3 izolatorska stupa slika 3.5.2 (desno) [15].

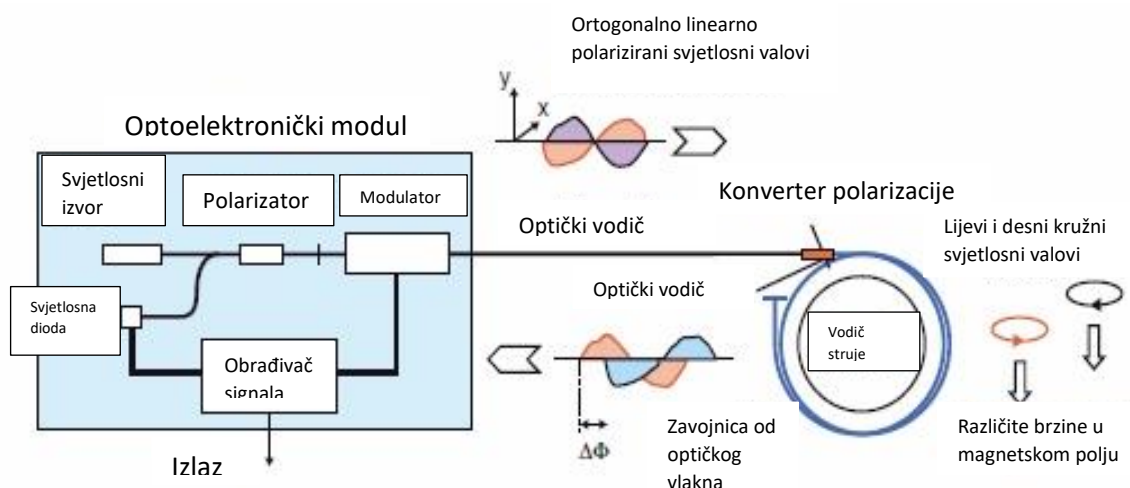


Slika 3.5.2 – Optoelektronički elementi i primjer instalacije mjernih transformatora

Optoelektronički moduli izvršavaju sljedeće zadatke slika 3.5.3.:

- šalju polarizirano svjetlo do osjetnih zavojnica
- primaju reflektirano polarizirano svjetlo od osjetne zavojnice
- uspoređuju u zatvorenoj petlji fazni pomak u polariziranom svjetlu u odnosu na magnetsko polje i primarnu struju
- pretvara rezultate u optički IEC 61850 komunikacijski signal na izlazu

Optoelektronički modul šalje optički izlaz kroz standardni ethernet vod do sekundarnih uređaja kao što su zaštitni uređaji. Sekundarni uređaji proizvedeni od bilo kojeg proizvođača moraju biti kompatibilni sa IEC 61850-9-2LE standardom koji se široko koristi kod pametnih mreža i digitalnih podstanica.



Slika 3.5.3. – Radni princip strujnog optičkog senzora

Prednosti korištenja strujnog mjernog transformatora na bazi optičkih vlakana [15]:

- **Korištenje pametnih mreža i digitalnih podstanica:** Digitalno sučelje dizajnirano za IEC 61850-9-2LE komunikaciju za integraciju u digitalne podstanice
- **„Uključi&koristi“ rješenja:** Potpuno redundantni sustavi s zamjenjivim komponentama
- **Preciznost:** Obuhvaća moderne zahtjeve za preciznost u širokom temperaturnom rasponu. Dizajn je oslobođen od magnetskog zasićenja, prigodan za snimanje brzih tranzijentnih struja, struja kratkog spoja
- **Smanjene dimenzije:** Kompaktni dizajn koji zauzima manje prostora
- **Ekološki prihvatljiv:** Ne koristi ulje ili SF6 plin
- **Pouzdan:** Jednostavan i robustan dizajn sa samo dijagnozom kvarova i funkcijom alarma
- **Siguran:** Pruža izlaz niskog napona, ispunjen dušikom na atmosferskom tlaku, rizik od eksplozije je ravan nuli
- **Kompatibilan:** Standard IEC 61850-9-2LE omogućava kompatibilnost sa drugim uređajima
- **Pojednostavljeno inženjerstvo:** Nazivni napon i nazivna struja su jedini parametri koje je potrebno specificirati
- **Lakoća instalacije:** Laki su, kompaktni i fleksibilni sa smanjenim troškovima ugradnje. Vanjsko postavljanje optoelektroničkih modula pored izolatora smanjuje duljinu vodova do osjetnika na minimum.



Slika 3.5.4 – Osjetna glava i primarni terminal (lijevo), samostojeći stup i izlaz optičkog voda (desno)

4. Digitalni standard IEC 61850

Novi internacionalni standard za komunikaciju između podstanica IEC 61850 dopušta razvijanje nove generacije zaštite podstanica, automatizacije i upravljačkih sustava koje rezultira u značajnom smanjenju troškova takovih sustava, dok u isto vrijeme unaprjeđuje funkcionalnost različitih primjena. Nekonvencionalni mjerni transformatori sa digitalnim sučeljem baziranim na IEC 61850-9-2 procesnoj sabirnici eliminiraju neke od problema u razlici kod zaštite i mjeriteljskih zahtjeva. Podaci se mogu procesuirati putem bilo kojeg uređaja da bi se izvršila drukčija vrsta zaštite, automatizacija ili upravljačka funkcija. IEC 61850 internacionalni standard za komunikaciju u podstanicama donosi novu eru u razvoju istih. Ima izravan utjecaj na dizajn same zaštite podstanica, nadzorne i upravljačke sustave, već i na dizajn sekundarnih krugova podstanica [14].

Tijekom posljednjih par godina zanimanje tržišta za IEC 61850 standard je jako evidentno kako sa strane proizvođača tako i sa strane kupaca. Velika većina ovog interesa usmjereno je ka migraciji sa proizvođačem uvjetovanoj komunikaciji putem bus sabirnica prema automatskim sistemima koji u potpunosti integriraju inteligentni elektronički uređaji kao što su zaštitni releji na novo prihvaćenom internacionalnom standardu.

Ovaj se pristup uglavnom bazirao na IEC 61850-8.1 sabirnicama, emulirajući i poboljšavajući konvencionalni SCADA pristup i na zamjenu čvrsto žičane komunikacije između sustava zaštite podstanica i kontrolnih uređaja koji koriste GOOSE komunikaciju. Ali to je tek dio poboljšanja koje IEC 61850 standard može ponuditi, dok je IEC 61850-9.2 još uvelike neistražen.

IEC 61850-9.2 je dio standarda koji dovodi nekonvencionalne mjerne transformatore i njihovu tehnologiju te prednosti kao što su eliminacija prijelaznih pojava, poboljšanja u sigurnosti i preciznosti, smanjenju u troškovima ožičenja i imaju utjecaj na topologiju podstanica. Više od 15 godina naprednih istraživanja i različitih projekata po cijelom svijetu dokazuju izvrstan potencijal ove tehnologije.

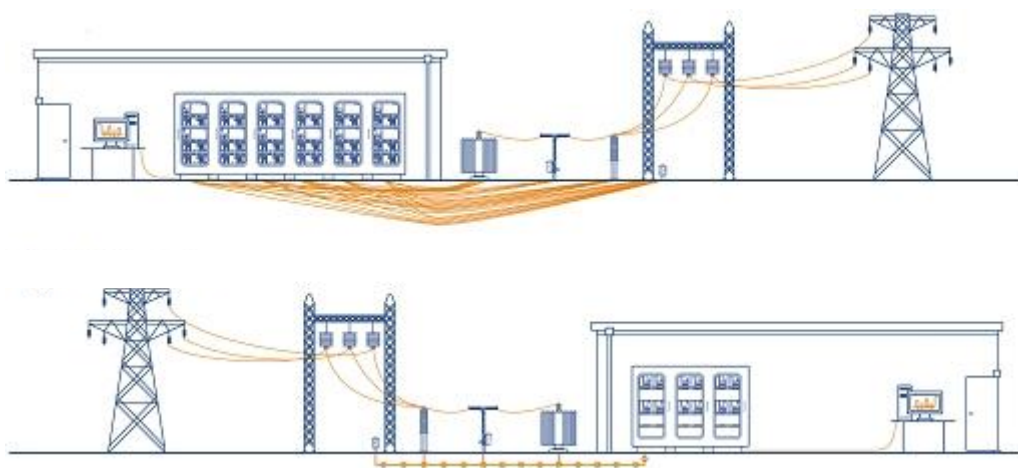
Primjene koje se baziraju na procesnim sabirnicama pružaju neke značajne prednosti nad konvencionalnim žičanim analognim krugovima. Prva jako važna prednost je u značajno smanjenje cijene sustava iz razloga što je velik broj bakrenih žica zamijenjen malim brojem kablova od optičkih vlakana. Druga prednost je eliminacija zasićenja strujnih transformatora zbog eliminacije strujnog otpora vodiča RL. U ovom slučaju sekundar strujnog transformatora je spojen na fazni ulaz integrirajuće jedinice i RL je praktično jednak nuli.

Dodatna korist rješenja sa procesnim sabirnicama je poboljšanje u sigurnosti podstanica eliminacijom jednog od glavnih problema za sigurnost, problem otvorenih strujnih krugova. Kako je jedini strujni krug između sekundara strujnog transformatora i ulaza integrirajuće jedinice locirane odmah pokraj njega, vjerojatnost za struju otvoren kruga je vrlo mala, a postaje ne postojeća ako se koriste optički senzori struje.

Procesne sabirnice su obećavajuća tehnologija a prva iskustava su potvrdila njihovu iskoristivost. Procesne sabirnice su ponajviše gurane od strane nekonvencionalnih mjernih transformatora kako bi se mogli spojiti na zaštitne uređaje, a testiranje obiju tehnologija je razlog danas još relativno slabe uporabe navedenih tehnologija.

Sa uvođenjem IEC 61850-9-2 procesnih sabirnica nekonvencionalni mjerni transformatori kao što su Rogowski svitak kombiniran sa optičkom vezom, kao i čisti optički senzori se sada mogu koristiti paralelno sa postojećim konvencionalnim mjernim transformatorima. Što daje pristup većoj količini senzora sa različitim performansama bez potrebe za značajnim redizajnom podstanica [14].

Nesumnjivo je kako ovaj standard postaje sve važniji i značajniji kako kod implementacije novih sustava u postojeće postrojenja tako i kod izgradnje novih postrojenja otvarajući mogućnost korištenja opreme od različitih proizvođača.



Slika 4.1. – Usporedba konvencionalne i digitalne podstanice

5. Zaključak

Promatramo li elektroenergetski sustav vidimo da sa svakom godinom postaje sve veći i kompleksniji pogotovo u današnje vrijeme gdje je naglasak na obnovljivim izvorima električne energije što sve dodatno povećava kompleksnost elektroenergetskog sustava. Tu raste potreba za sve bržim i preciznijim mjerenjima sa naglaskom i na zaštitu cjelokupnog sustava. Posljednjih par godina pojavljuju se nove tehnologije bazirane na tehnologiji optičkih vlakana i optičkih senzora koje pružaju velike prednosti u odnosu na konvencionalne mjerne transformatore, a neke od njih su: kompatibilnost, manja cijena, smanjeni troškovi ugradnje, manjih su dimenzija, povećane sigurnosti. Principi rada tih tehnologija i prednosti svake od njih je obrađena u ovom radu i demonstriran je primjer jednog takvog mjernog transformatora. Najvažnija razlika je u mogućnosti digitalne komunikacije što otvara velik broj primjena i načina korištenja istih.

Problem se pojavljuje jer se današnji elektroenergetski sustav još uvelike oslanja na konvencionalne mjerne transformatore koji su se pokazali jako pouzdanima i sa dugim vijekom rada i do 40g. te kompanije ne vide potrebu za prelaskom na nekonvencionalne mjerne transformatore koji se još trebaju pokazati. Tu se pokazuje inertnost prema promjenama i skeptičnost cijelog elektroenergetskog sustava za nove tehnologije. Stanje je dodatno za nekonvencionalne mjerne transformatore nepovoljno bilo jer nije postojao standard između proizvođača tako da je instalacija istih bila moguća samo kod izgradnje novih podstanica i ograničena na jednog proizvođača.

Dolaskom IEC 61850 standarda to se konačno mijenja jer osim mogućnosti korištenja uređaja različitih proizvođača moguće ih je i koristiti paralelno sa postojećim konvencionalnim mjernim transformatorima i postojećom relejnom zaštitom.

Pred nekonvencionalnim mjernim transformatorima je svjetla budućnost u kojoj se trebaju iskazati i nametnuti kao najbolje rješenje za mjerenje i zaštitu, ali veliki naglasak ostaje na proizvođačima i kompanijama koji trebaju zajedno raditi na njihovom razvoju i primjeni što na početku nije bilo tako.

6. Literatura

- [1] Euramet - Publishable JRP Summary Report for ENG61 FutureGrid
Non-conventional voltage and current sensors for future power grids
Siječanj 2017
- [2] Artech - An approach to instrument transformers, Training booklet: 1
- [3] Mirsad Madeško – Nekonvencionalni mjerni transformatori NCIT
Sarajevo 2010,
<https://www.scribd.com/document/44973596/NCIT-Nekonvencionalni-Mjerni-Transformatori>
- [4] ABB – Instrument transformers application guide, ABB 2015
- [5] Bojan Nikolić, Sanowar Khan and Nikita Gabdullin
Journal of Physics: Conference Series 772 (2016) 012065
Development of non-conventional instrument transformers (NCIT) using smart materials
- [6] JON IVAR JUVIK, A Calibration System for Instrument
Transformers with Digital Output, THESIS FOR THE DEGREE OF LICENTIATE OF
ENGINEERING, Department of Electric Power Engineering
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden 2001
- [7] Optical fiber, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber
- [8] Fiber optics, Explain that stuff,
<http://www.explainthatstuff.com/fiberoptics.html>
- [9] Faraday effect, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect
- [10] Pockels effect, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Pockels_effect
- [11] Pockels cells, RP Photonics Encyclopedia
https://www.rp-photonics.com/pockels_cells.html
- [12] Rogowski coil, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil

- [13] PEM, Rogowski coil, How it works
<http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>
- [14] Damien Tholomier ,Denis Chatrefou, AREVA T&D, PAC Winter 2008
IEC 61850 Process Bus - It is Real!
- [15] ABB, Fiber optics current sensor – Free standing (FOCS-FS), Enabling smart grids and digital substations
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2GJA708628&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

7. Sažetak

U ovom radu smo dali kratki osvrt na konvencionalne visokonaponske mjerne transformatore, koji su dosegli svoj optimum i nisu se mijenjali zadnjih par desetljeća. Napretkom tehnologija pojavili su se novi načini za mjerenje uglavnom zasnovani na optičkim senzorima koje u praksi nazivamo nekonvencionalnim mjernim transformatorima. Spomenuli smo neke od njihovih prednosti u odnosu na konvencionalne i obradili osnovne principe na kojima oni rade, te dali primjer jednog takvog mjernog transformatora. Spomenuta nova tehnologija za prijenos informacija koristi optičke vodove i ima mogućnost digitalne komunikacije. Na kraju smo još spomenuli uvedeni novi standard koji je bitan za buduće korištenje nekonvencionalnih mjernih transformatora.

Ključne riječi: konvencionalni mjerni instrumenti, nekonvencionalni mjerni instrumenti, Rogowski, Farradey, Pockels, IEC 61850, visokonaponski mjerni transformatori

Abstract

Nonconventional High Voltage Instrument Transformers

In this paper, we have briefly reviewed the conventional high-voltage transformers, which have reached their optimum and have not changed for the last couple of decades. By advancing the technology new measurement methods appeared, which are largely based on optical sensors, which in practice are called unconventional metering transformers. We have mentioned some of their advantages in relation to conventional and have elaborated the basic principles in which they work, and give an example of such a measuring transformer. The aforementioned new information transfer technology utilizes optical fiber optics and has the capability of digital communication. Finally, we have mentioned the introduction of a new standard that is essential for the future use of unconventional metering transformers.

Keywords: conventional instrument transformers, nonconventional instrument transformers, Rogowski, Faraday, Pockels, IEC 61850, high voltage transformers

8. Životopis

Tomislav Kovačević rođen je u Vinkovcima 30.08.1987. godine. Osnovnu školu pohađao je u Vinkovcima. Nakon završetka osnovne škole 2002. godine upisuje srednju tehničku školu za zanimanje elektrotehničar koju završava 2006. godine. Iste te godine upisuje Osječki elektrotehnički fakultet dislociran u Vinkovcima, preddiplomski stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika koji prekida 2008. godine. Studiranje nastavlja 2013. godine na Elektrotehničkom fakultetu Osijek isto na preddiplomskom stručnom studiju elektrotehnike, smjer elektroenergetika koji trenutno završava. Ima ambicije i daljnje želje za usavršavanjem i napredovanjem te planira upisati diplomski studij.

9. Prilozi

9.1 Nazivne vrijednosti i tehnički detalji za strujni mjerni transformator na bazi optičkih vlakana

Parameters	[unit]	FOCS-FS 245	FOCS-FS 420	FOCS-FS 550	FOCS-FS 800
System Voltage					
Rated frequency	[Hz]	50 / 60			
Highest voltage for equipment	[kV _{r.m.s.}]	245	420	550	800
Rated power-frequency withstand voltage [60 s]	[kV _{r.m.s.}]	460	630	680	975
Rated lightning impulse withstand voltage [1,2/50 μs]	[kV _{peak}]	1050	1425	1550	2100
Rated switching impulse withstand voltage [250/2500 μs]	[kV _{peak}]	N/A	1050	1175	1550
Current ratings					
Rated primary current	[A]	2000 ÷ 4000			
Rated continuous thermal current	[A]	2400 ÷ 4800			
Rated short circuit current (1 s)	[kA]	63 (1 s) 40 (3 s)			
Rated dynamic current	[kA]	164			
Insulator					
Material	N/A	composite - gray			
Min nominal specific creepage distance	mm/kV	31 (Pollution level 4 - Very Heavy)			
Static withstand loads	N	Class II: 4000	Class II: 5000		as per customer specifications
Insulation fluid	N/A	N ₂			
Filling absolute pressure	MPa	= ambient pressure			
Accuracy					
Protection accuracy	N/A	IEC Class 5P, 5TPE – IEEE 10%			
Interfaces					
Primary terminals	N/A	As per IEC 62271-301 As per ANSI/NEMA CC 1-2009 Other design available on request			
Digital output	N/A	Digital output (IEC 61850 9-2 LE) Optical ethernet cable: Duplex MM 62.5/125 with ST connector Optical 1PPS cable: Duplex (or Simplex) MM 62.5/125 with ST connector			
Options					
Redundancy of electronics	N/A	Available on request			
Merging unit for VT signals	N/A	Available on request			
Redundancy of power supply	N/A	Available on request			
Environmental conditions					
Outdoor equipment operating temperature (shade)	[°C]	-40; +45			
Air pollution	N/A	Very Heavy			
Corrosive environment [ISO 12944-2]	N/A	C3 ÷ C5 (Medium ÷ Very high)			
Ice load	mm	20			
Seismic level	g	0,5			
Dimensions and weights					
HV Column height (one phase)	[mm]	2716	4256	5066	7116
HV Column weight (one phase)	[kg]	172	240	276	363
Fixing points on pedestal	N/A	#4 holes ø22 at 480 x 480 mm			
Control Cabinet dimensions (width x height x depth)	[mm]	800 x 1000 x 300 (non redundant system) 1000 x 1200 x 300 (redundant system)			
Control Cabinet weight	[kg]	120 (non redundant opto-electronics with merging unit) 150 (redundant opto-electronics with merging units)			